



Universitat de Lleida
Escola Politècnica Superior



Sistema de refrigeració d'una bateria de cotxe elèctric

Autora: Isabel Díez Fontanet

Tutora: Íngrid Martorell Boada

Treball Final de Grau

Juny 2017

Grau en Enginyeria Mecànica

Universitat de Lleida – Escola Politècnica Superior

GLOSSARI

Definicions

Ànode	Elèctrode receptor de càrregues negatives en tots aquells dispositius a l'interior dels quals existeix un medi no metàl·lic que esdevé conductor sota determinades condicions
Càtode	Elèctrode fornidor de càrregues negatives i receptor de les positives en tots aquells dispositius a l'interior dels quals hi ha un medi no metàl·lic
Electròlit	Substància que, fosa o dissolta en un solvent ionitzant, es dissocia donant ions i, doncs, esdevé conductora de l'electricitat
MatLAB	Software matemàtic CAS
SOC	State Of Charge (Estat de càrrega)
SOH	State Of Health (Estat de salut)
VE	Vehicle elèctric
DoD	Depth of Discharge (Profunditat de descàrrega)

Abreviatures

CAS	Sistema Algebraic Computacional
Li-ion	Bateria d'ions de liti
NiMh	Bateria níquel i hidrur metàl·lic



PbSO₄	Bateria de plom i àcid sulfúric
H₂SO₄	Símbol de l'àcid sulfúric
Mn	Símbol per l'element químic manganès
Pb	Símbol per l'element químic plom
O₂	Símbol per l'element químic oxigen
Ni	Símbol per l'element químic níquel
H₂	Símbol per l'element químic hidrogen
S	Símbol per l'element químic sofre
H₂O	Símbol de l'aigua
Li	Símbol per l'element químic liti

Unitats

°C	Graus Celsius
K	Graus Kelvin
CFM	Cubic Feet Meter
BTU/h	Potència de refrigeració
rpm	Velocitat angular
Pa	Pascal
Inch-H₂O	Polzades d'aigua
atm	Atmosferes de pressió
J	Joules
Ah	Ampers per hora



Variables

ρ	Densitat $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$
c_p	Calor específica $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right)$
α	Coefficient de conductivitat tèrmica $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}\right)$
μ	Viscositat dinàmica $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}\right)$
ν	Viscositat cinemàtica $\left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)$
C	Capacitat elèctrica (Ah)
Φ	Flux de calor (J)
λ	Conductivitat tèrmica $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}\right)$
A	Àrea (m^2)
T_H	Temperatura de la font calenta (K)
T_C	Temperatura de la font freda (K)
d	amplada del material en direcció de la transferència de calor (m)
a	Difusivitat tèrmica $\left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)$
Nu	Número de Nusselt, variable adimensional
L	Longitud (m)
c	Velocitat lineal $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$
Re	Número de Reynolds, variable adimensional
Nu_∞	Número de Nusselt mitjà en tota la superfície de transferència de calor, variable adimensional



Pr	Número de Prandtl, variable adimensional
ϵ	Emissivitat per radiació, variable adimensional
σ	Constant d'Stefan-Boltzmann, $\sigma \approx 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$
Q	Quantitat de calor, (J)
I	Intensitat (A)
t	Temps (s)
R	Resistència elèctrica (Ω)
P_{out}	Potència de sortida (W)
P_{heat}	Potència dissipada en forma de calor (W)
V	Tensió (V)
\dot{V}	Flux de volum $\left(\frac{L}{s}\right)$, $\left(\frac{m^3}{s}\right)$, (CFM)
\dot{m}	Flux de massa $\left(\frac{kg}{s}\right)$

Contingut

1. Introducció.....	9
2. Objectius.....	10
3. Abast.....	12
4. Característiques de les bateries.....	13
4.1. Físiques.....	14
4.2. Estat de les bateries.....	16
5. Principi de funcionament de les bateries convencionals.....	19
5.1. Tipus de bateries utilitzades en vehicles elèctrics	21
5.1.1. Bateries d'àcid de plom	22
5.1.2. Bateries d'ió-liti	24
5.1.3. Bateries de níquel i hidrur metàl·lic	26
5.1.4. Comparació de bateries.....	27
5.2. Mètodes de transferència de calor	29
5.3. Generació de calor en les bateries	36
6. Sistemes de gestió de bateries de vehicles elèctrics.....	39
6.1. Sistemes de refrigeració.....	40
6.1.1. Principi de funcionament dels sistemes de refrigeració	40
6.1.2. Sistemes de vehicles elèctrics existents.....	43
6.1.2.1. TESLA	43
6.1.2.2. General Motors	44
6.1.2.3. BMW.....	45
6.1.2.4. FORD	46

6.1.2.5. NISSAN	47
6.1.3. Comparació de les bateries existents	48
7. Caracterització de la bateria	50
8. Càlculs	54
8.1. Determinació del valor alpha.....	55
8.1.1. Procediment per eficiència del 90%	56
8.1.2. Resultats per una eficiència del 80%	60
8.2. Selecció del ventilador.....	61
8.2.1. Estudi viabilitat del ventilador	62
8.2.2. Caracterització del ventilador	71
8.3. Selecció del sistema de refrigeració extern	75
8.3.1. Estudi de viabilitat	76
8.3.2. Caracterització del sistema de refrigeració.....	78
9. Resultats	79
10. Present i futur de les bateries	82
10.1. Reciclatge	83
10.1.1. Bateries d'àcid-plom.....	83
10.1.2. Bateries d'ions de liti	85
10.1.3. Bateries de níquel i hidrur metàl·lic	86
10.2. Recerca	87
11. Conclusions	90
12. Agraïments	92
REFERÈNCIES	93
Bibliografia.....	93

Referències WEB	93
ANNEXOS	102
Annex 1. Full de dades de la bateria 24V, 25Ah.....	102
Annex 2. Codi MatLAB	104
Annex 3. Propietats de l'aire a 1atm de pressió	108
Annex 4. Diagrama Pressió-Entalpia: refrigerant R134a.....	109
Annex 5. Taula comparativa de bateries existents	110
Annex 6. Oferta de preus dels ventiladors CASALS	111
Annex 7. Taules consultades pel resum de la Taula 2	112

1. Introducció

Atès que els vehicles elèctrics (VEs) són, actualment, considerats els successors més prometedors dels cotxes de combustió interna convencionals, una gran quantitat d'esforç i diners són invertits anualment per resoldre els problemes als que, principalment, les bateries d'aquests automòbils encara afronten.

El problema essencial d'aquestes bateries és que produeixen molta calor mentre el VE està en funcionament, i aquesta calor s'ha de dissipar de la manera més eficient possible. La calor excessiva és dolenta per tot tipus de bateries ja que molts processos d'envelliment són dependents de la temperatura i això provoca un decrement del cicle de vida dels mòduls. Aquests mòduls poden arribar a suposar dues terceres parts del cost i pes d'un vehicle elèctric, per tant, l'envelliment prematur d'aquests dispositius s'ha d'evitar.

Aquest projecte es focalitza en les característiques i funcions dels mòduls de bateries de VEs refrigerats per convecció forçada d'aire. Es discuteixen diferents qualitats físiques i factors que afecten la producció de calor amb l'objectiu de millorar la refrigeració d'aquests. Com a part del treball presentat a continuació, es desenvolupa un codi matemàtic a partir del software CAS MatLAB amb la intenció d'agilitzar els càlculs perquè es necessita fer un càlcul iteratiu per aproximar el valor del coeficient de transferència de calor per convecció ja que no hi ha una llei o teoria matemàtica que doni el valor correcte d' α per qualsevol situació.

Les qüestions principals a contestar són: quina és la connexió entre la capacitat elèctrica i la capacitat calorífica de les bateries? Quins són la velocitat i el volum del flux d'aire a diferents situacions, quan s'utilitza el sistema de refrigeració per convecció d'aire? Com calcular el coeficient de transmissió tèrmica α ? També es vol proporcionar nocions bàsiques del funcionament de l'aire condicionat, utilitzat en la refrigerar per convecció forçada d'aire, les bateries elèctriques dels VEs i discutir la química i processos termodinàmics bàsics que tenen lloc dins una bateria en ser utilitzada.

2. Objectius

L'objectiu principal d'aquest treball és familiaritzar-se amb el principi de funcionament químic de les bateries i la seva instal·lació per tal d'evitar el deteriorament prematur degut al sobreescalfament i assegurar-ne el bon funcionament durant el temps de vida útil marcat pel fabricant.

La bateria entorn la qual es centra el projecte és una bateria de vehicle elèctric per tant, un objectiu principal d'aquest és també l'estudi de les diferents tecnologies utilitzades per fabricants d'automòbils elèctrics així com utilitzar aquesta informació per dissenyar un sistema de bateria i refrigeració a partir de components individuals.

Com a objectiu principal també hi ha la recerca dels mètodes de reciclatge dels tipus de bateries esmentats i les característiques que es pretenen millorar i desenvolupar per part del món científic. Es pretén fer d'aquests dispositius una opció més atractiva pels consumidors de vehicles convencionals amb la finalitat de pujar les vendes de vehicles elèctrics respecte els de combustió interna convencionals.

Els objectius secundaris es descriuen a continuació:

- Estudi de les bateries del mercat: aquest objectiu consisteix en recollir informació sobre el tipus de bateries que es poden trobar al mercat, explicar-ne el principi de funcionament i els materials o elements químics presents en cada una d'elles.
- Escollir el tipus de mòduls que s'utilitzaran en el desenvolupament del projecte: aquest punt consisteix en escollir, d'entre els tipus de bateries detallats amb anterioritat, el que més s'ajusta a l'aplicació del treball, un vehicle elèctric.
- Definir el sistema de refrigeració: els mòduls necessiten d'un sistema de refrigeració apropiat per tal d'evitar sobreescalfaments, que podrien suposar el deteriorament prematur i reducció del cicle de vida de les bateries. Per això s'ha

d'escollir si es vol refrigerar els mòduls a partir d'un circuit d'aire o líquid, obert o tancat.

- Escriure i utilitzar un codi matemàtic per determinar les característiques d'aquest sistema de refrigeració: un sistema com aquest pot dependre de múltiples variables i equacions que necessiten ser calculades a partir d'un software CAS, en aquest cas s'utilitzarà el MatLAB, per agilitzar la feina de càlcul.

3. Abast

En aquest projecte es dimensiona el sistema de refrigeració per a una bateria d'ions de liti. Aquesta feina és complexa i per fer-ho s'han realitzat les següents assumpcions:

- El mòdul complet tindrà 8 cel·les tal i com es pot veure en la Figura 1. En concret les 8 cel·les són les zones separades per les ranures de refrigeració.
- Entre cada cel·la hi ha una ranura de refrigeració, que fa un total de 7. Aquestes estan simplifiades respecte la bateria original a rectangles de 5,90x72,00x127,42mm.
- El mòdul també està simplificat a un prisma de dimensions 131,00x366,50 com es veu en la Figura 1, amb una profunditat de 127,42mm.

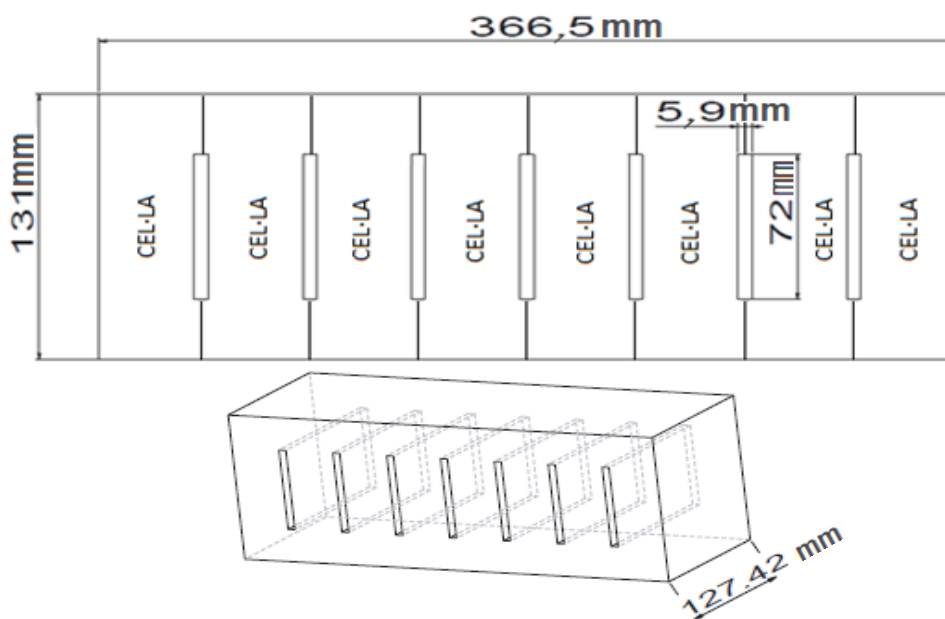


Figura 1. Dimensions del mòdul del projecte (Font: dibuix propi)

Possibles càlculs econòmics no tindran cabuda en aquest projecte, sinó que es centrarà en l'estudi del funcionament de les bateries i després la selecció del sistema de refrigeració apropiat perquè el mòdul funcioni correctament.

Les dimensions de la bateria i les ranures destinades a la refrigeració s'ha simplificat i aproximat a rectangles per tal de facilitar els càlculs d'àries i volums. Per altra banda, existeixen fórmules correlatives que proporcionen paràmetres adimensionals (Nusselt, Reynolds, Prandtl) per calcular el coeficient de transferència de calor per convecció. Però aquestes sols són aplicables per geometries concretes i simples. Per aquesta raó s'ha aproximat la forma de les ranures a una de senzilla i la qual té una aplicació en aquestes fórmules.

Per a assegurar aquest funcionament, s'ha considerat que la temperatura màxima a la que la bateria pot arribar són els 40°C, i a partir d'aquesta limitació es faran els dimensionaments del ventilador que refrigeri, a través de les ranures de refrigeració, la bateria per assegurar que no es deteriora per sobreescalfament. (Apuntes de Baterías para vehículo eléctrico 2: Baterías de litio, 2017).

4. Característiques de les bateries

Les bateries tenen unes característiques físiques evidents com la mida i la forma. Però també hi ha altres parts que componen les parts essencials pel correcte funcionament de les tecnologies que permeten l'emmagatzematge i distribució d'energia com l'ànode, el càtode i l'electròlit. Totes aquestes característiques també determinen uns valors que es tradueixen en les especificacions d'aquestes, llistades a la Taula 1.

A part de les especificacions de la Taula 1, l'estat en el que es troben les bateries també es determina a partir del funcionament d'aquestes parts físiques. Aquest es defineix per dos valors molt importants SOC i SOH explicats amb més detall a l'apartat 4.2.

4.1. Físiques

Les bateries es poden dividir en diferents grups depenent de les seves característiques. Per comparar bateries utilitzades per conduir vehicles elèctrics, les característiques principals són la densitat energètica, la potència, l'eficiència, el cicle de vida i el cost d'aquestes. En la Taula 1 hi ha una breu explicació de cada una d'elles.

Taula 1. Característiques principals de les bateries (Font: Electromovilidad, 2016)

Densitat energètica	Wh/kg. Energia que una bateria pot proporcionar per kg. Com major sigui aquest paràmetre, més autonomia o menys pes pot tenir aquell vehicle.
Potència	W/kg. Es tracta de la capacitat per subministrar energia en el procés de descàrrega. Una major potència es relaciona amb un millor rendiment del vehicle.
Eficiència	Fa referència a la quantitat d'energia necessària per carregar la bateria comparada amb l'energia que aquesta és capaç de subministrar en la seva descàrrega. L'energia que no s'utilitza es transforma en calor.
Rendiment	Fa referència a la relació de proporcionalitat establerta entre l'efecte útil obtingut i l'energia consumida per a obtenir-lo.
Cost	Habitualment es compara amb l'energia, massa i abast. Per exemple: cost per kWh, cost per kg o cost per km.
Vida útil	Correspon al número de cicles de càrrega-descàrrega complets que pot suportar sense perdre eficiència i rendiment.

Pel que fa al principi de funcionament d'una bateria recarregable (o qualsevol cel·la energètica) es pot simplificar en tres parts: ànode i càtode separats per un electròlit. Aquestes estan representades a la Figura 2.

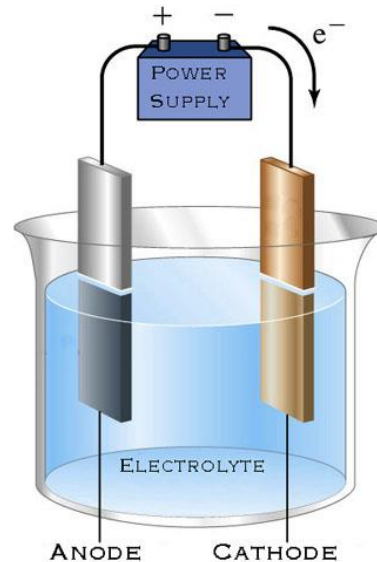


Figura 2. Principi de funcionament de les bateries (Font: nontoxicprint.com, 2017)

El principi bàsic del funcionament de les bateries és el moviment d'electrons que succeeix entre l'ànode i el càtode dels mòduls que la componen. Aquests són creats a l'interior de la bateria a partir de reaccions d'oxidació-reducció i transportats per un circuit extern. A l'ànode hi ha un excés d'electrons, mentre que al càtode hi ha un dèficit d'aquests. La funció de l'electròlit és la de transmetre càrregues en forma d'ions que, posteriorment, seran transformats en electrons en un circuit extern.

Quan els pols positiu i negatiu de la bateria es connecten a un circuit com en la Figura 2, els electrons poden traslladar-se fins al càtode a través d'aquest circuit extern i, en aquest trasllat, produeixen un treball elèctric. En algunes ocasions, les bateries necessiten una membrana que aïlli elèctricament l'ànode i el càtode amb l'objectiu d'evitar que els electrons es traslladin directament des de l'ànode al càtode sense passar pel circuit extern i d'aquesta manera, sense produir corrent elèctric. (Electropaedia, 2016). Al capítol 5.1 es discuteixen diferents tipus de bateries.

D'igual manera, al capítol 5.3 es desenvolupen els aspectes termodinàmics que provoquen la generació de calor de les bateries durant el seu funcionament.

4.2. Estat de les bateries

Hi ha dues expressions principals que defineixen l'estat en el que es troba una bateria i aquests són l'estat de càrrega (SOC) i l'estat de salut (SOH). Per entendre aquestes característiques:

- SOC: és el nivell de càrrega d'una bateria, normalment expressat en percentatge respecte el total de la capacitat màxima de la que disposa. Per exemple, l'estat de càrrega d'una bateria després de ser carregada totalment és del 100% i quan hi ha $\frac{1}{4}$ parts d'aquesta, el valor és del 25%. És recomanable que el SOC d'una bateria, abans de ser carregada novament, sigui el suficientment baix perquè hi hagi més lloc per recarregar la bateria a partir de fonts externes, com la xarxa elèctrica AC. Però també és important no arribar a un SOC massa baix (0-10%) perquè la bateria mantingui l'assistència elèctrica d'alimentació i per evitar problemes en les reaccions químiques en les bateries sensibles a descàrregues profundes.
- SOH: representa la capacitat relativa d'una bateria i aquesta es calcula segons l'Eq. 1:

$$C_{relativa} = \frac{C_{np}}{C_{n0}} \quad \text{Eq. 1}$$

On:

C_{np} és la capacitat real i actual de les cel·les (Ah)

C_{n0} és la capacitat inicial d'aquestes cel·les (Ah)

$C_{relativa}$ és la capacitat relativa expressada en %

Generalment, es considera que la bateria ha arribat al final de la seva vida útil quan la capacitat relativa és del 20%, és a dir, ha perdut el 80% de capacitat respecte la inicial testada abans de la primera càrrega.

Per tenir una visió més pràctica del que suposa cada una d'aquestes expressions, és té la següent figura:



Figura 3. Diferència entre SOC i SOH (Font: Thehybridshop, 2017)

- En la primera imatge de la Figura 3 es té un bon estat de càrrega i bon estat de funcionament: la galleda està plena d'aigua (representa el voltatge en una bateria) i exerceix una certa pressió (capacitat relativa). En buidar-se la galleda s'obté la mateixa quantitat d'aigua que hi ha inicialment i s'allibera també la mateixa pressió que la que hi havia en un principi. De la mateixa manera, en descarregar-se la bateria se n'obté la mateixa tensió i proporciona la mateixa capacitat relativa que la que s'ha emmagatzemat.
- En la segona imatge de la Figura 3 es té un bon estat de càrrega, però mal estat de salut: si la galleda està mig plena d'aigua i mig plena de pedres, plena el nivell de la galleda és el mateix que en el cas inicial quan només hi havia aigua, per tant, la bateria continuaria marcant que la capacitat o voltatge són els màxims, però sol donarà la meitat d'aquesta.
- Si la galleda està mig plena d'aigua i mig plena d'arena, continuarà marcant que està plena i té el màxim de voltatge i capacitat disponibles, però continuarem obtenint tan sols part d'aquesta. En aquest cas, l'arena també alenteix el subministrament d'aigua, per tant, si en aquesta condició es demana un comportament normal de la bateria, aquesta no podrà subministrar amb la mateixa rapidesa que en condicions ideals.

- En la tercera imatge de la Figura 3 es té un mal estat de càrrega i mal estat de salut: en el cas que la galleda tingués uns forats a la part superior, no importa quanta aigua hi fiques per emplenar-la perquè aquesta es perdrà pels forats. El mateix passa a les bateries quan deixen de carregar-se al màxim i això afectarà al comportament d'aquestes.

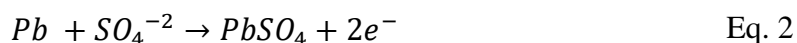
5. Principi de funcionament de les bateries convencionals

L'explicació del principi de funcionament de les bateries convencionals i les reaccions químiques involucrades, es farà amb l'exemple de les bateries d'àcid-plom perquè van ser el primer tipus a desenvolupar i són amb les que més s'ha investigat. D'igual manera, els components són molt tòxics i perillosos, per tant, les investigacions tecnològiques i científiques actuals estan enfocades a millorar no sols el comportament sinó també la seguretat i respecte al medi ambient d'aquestes. Aquest és un tema que es desenvoluparà al capítol 10.

Les bateries d'àcid de plom utilitzen àcid sulfúric barrejat amb aigua com a electròlit i el material utilitzat com a ànode és el plom (Pb) i pel càtode el diòxid de plom (PbO₂).

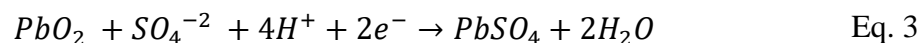
Ambdós productes (el plom i l'àcid sulfúric) són contaminants i perjudicials per la salut, per aquesta raó, aquests tipus de bateries poden suposar un gran risc per als éssers vius en cas de fuga dels seus components a aigües potables, que es tornen no potables, i al sòl, doncs els productes cultivats en aquelles terres estaran contaminats i suposaran un risc en consumir-los.

Per estudiar el principi de funcionament d'aquestes, primer s'explica el procés de descàrrega. Durant aquest, l'ànode (pol negatiu) s'oxida, per tant, adquireix electrons de l'electròlit seguint la següent reacció química:



On SO₄⁻² correspon a l'àcid sulfúric. Com s'ha mencionat anteriorment, la càrrega que el nou material, ió sulfat de plom, té es transforma en 2 electrons lliures, d'aquesta manera s'allibera energia.

En el càtode, aquests dos electrons reaccionen amb el diòxid de plom, juntament amb l'hidrogen de l'electròlit (àcid sulfúric barrejat amb aigua) i succeeix la reacció de reducció següent:



Dos electrons són eliminats de la capa de valència i es transforma en sulfat de plom i aigua. Un fet important és que tant en l'ànode com en el càtode es crea sulfat de plom, fet que dificulta la seva habilitat de conduir electrons. En el procés de càrrega, les mateixes reaccions tenen lloc, però en la seqüència revertida, ja que el sulfat de plom també és reduït en la càrrega (Lliçó: Lead-acid bateries, University of Colorado, 2016).

Degut a les propietats químiques i les reaccions anteriorment descrites, es pot obtenir aproximadament 2V d'una sola cel·la corresponent a una bateria d'àcid de plom. Connectant 6 cel·les en sèrie es pot aconseguir els 12V típics.

5.1. Tipus de bateries utilitzades en vehicles elèctrics

Com les bateries d'àcid de plom van ser les primeres en sortir al mercat, també són amb les que més s'ha investigat i experimentat. En un principi van ser utilitzades també com a bateries per conduir vehicle elèctrics. Però, avui en dia, el seu ús automobilístic es centra principalment en les bateries d'arrancada de cotxes de combustió interna convencionals. El fet que els materials d'aquestes bateries suposin un baix cost econòmic motiva el seu ús en sistemes petits, simples i que hagin de ser barats.

Les bateries basades en el sistema de salts mòltes, les quals necessiten entre 300 i 400°C de temperatura per operar correctament, s'han tornat interessants pels fabricants de vehicles elèctrics perquè tenen una densitat energètica relativament alta i els materials que les componen són comuns i barats. El problema que aquestes presenten és l'haver de mantenir una temperatura de funcionament tan alta, per això no són comuns en la indústria. Per aquesta raó són negligides a l'hora de redactar aquest projecte (Motiva, 2016).

El tipus de bateries més utilitzat en els VEs avui en dia són les d'ió-liti. Les de níquel i hidrur metàl·lic també s'utilitzen en altres aplicacions automobilístiques tot i això, es considera que les basades en liti les substituiran gradualment ja que, la densitat energètica de les bateries d'ions de liti és superior a la d'altres tipus (Bosch, p. 1135).

En els sub-capítols següents s'explica el principi de funcionament de cada una breument.

5.1.1. Bateries d'àcid de plom

El principi de funcionament de les bateries d'àcid de plom s'ha explicat més detalladament en l'apartat 5 com a exemple per explicar l'electroquímica present, en general, dins les bateries per a què aquestes funcionin.

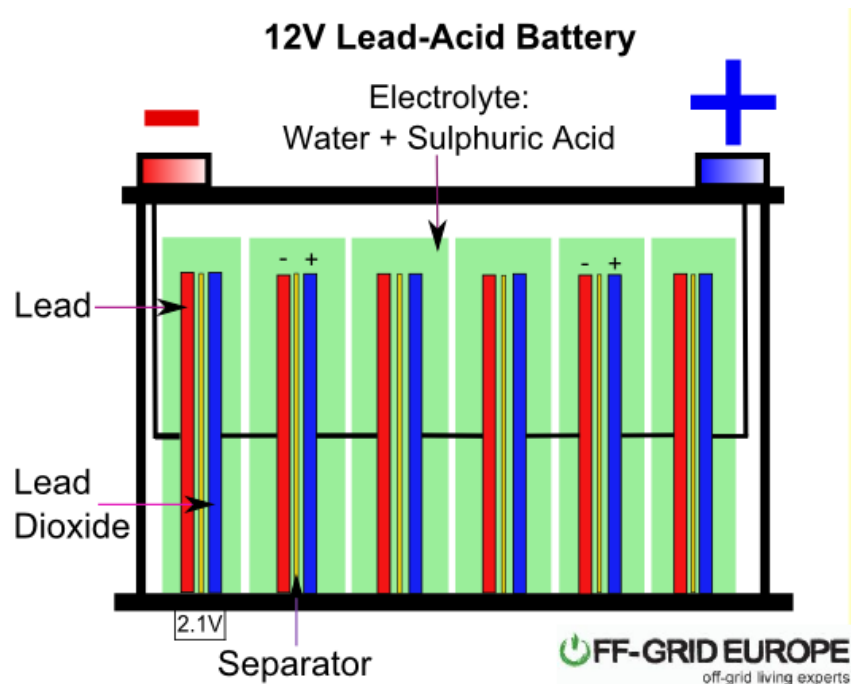


Figura 4. Estructura bàsica d'una bateria àcid-plom (Font: Off-Grid Europe, 2016)

En aquesta figura es veuen 6 cel·les dins un mòdul. Cada cel·la té un ànode de plom (barres vermelles) i un càtode de diòxid de plom (barres blaves) separats per un aïllant (barres grogues) per evitar-ne la transferència d'electrons directa. La barreja d'àcid sulfúric i aigua provoca l'oxidació de l'ànode fent que aquells electrons viatgin pel circuit extern cap al càtode, on hi ha una manca d'electrons i per tant una càrrega positiva, ja que els electrons tendeixen a moure's cap a les zones carregades positivament fins que aquestes es troben en estat neutre de càrrega.

Els aspectes positius d'aquestes bateries són l'alta tolerància que presenten respecte les sobrecàrregues, característica relacionada amb la capacitat d'aquestes a treballar en un rang de temperatures més ampli, entre els -20°C i els 50°C . Aquest és un gran avantatge

comparat amb els altres bateries ja que poden treballar en condicions favorables en ambients freds, com els països nòrdics.

Un altre punt a favor és el baix rati d'auto descàrrega, al voltant del 5%, fet que fa que un cop carregades es puguin deixar inutilitzades un llarg temps i després tornar-les a fer servir.

Els aspectes negatius que aquestes presenten són: la densitat d'energia està compresa entre un baix rang d'entre 20 i 30 kWh per kg (Bosch, p. 1135). Això significa que els vehicles conduïts per aquestes bateries són molt pesats i la distància que poden recórrer amb una sola recàrrega és molt baixa. L'eficiència energètica és d'entre el 50 i 70%, com consta a la Taula 2.

El cicle de vida també és baix, això significa que aguanta pocs cicles de càrrega-descàrrega sense perdre eficàcia, al voltant dels 1000 cicles (UPCommons, 2016).

Per altra banda, el cost per kWh és entre 80,00 i 200,00 €, això és degut a que els materials que les componen són comuns i barats. A més, s'hi suma la tradició arreu de fabricar les bateries d'arrancada dels cotxes convencionals (tutiendaenergetica.es), (autosolar.es). Aquest preu s'ha de comparar amb el preu de les bateries d'ions de liti d'aproximadament 10.000,00 € per kWh.

5.1.2. Bateries d'ió-liti

Hi ha diferents tipus de bateries ió-liti, totes anomenades depenent de l'òxid que es troba en el càtode, actualment els més comuns són níquel, manganès o cobalt. Els mòduls d'ió-liti tenen una alta tensió nominal (3,7V) comparades amb altres tipus. Per exemple, aquesta és 208% major que en les bateries de plom (1,2V) o 68% major que en les de níquel i hidrur metàl·lic (2,2V). L'energia específica i el comportament específic també són alts (Bosch, p. 1136). Aquestes bateries poden arribar a ser 6 vegades més lleugeres i fins a 3 vegades més petites en volum que les equivalents en plom. Hi ha més comparacions disponibles a la Taula 2 del capítol 5.1.4.

Enlloc de reacció de reducció-oxidació convencional, en les bateries d'ions de liti l'electroquímica en la que es basa el seu principi de funcionament consisteix en els moviments dels ions entre les diferents cel·les de la bateria. Cada una d'aquestes cel·les consisteixen en un ànode, un càtode, un electròlit i un separador aïllant. L'electròlit està compost per sals orgàniques de liti, però no pren part en les reaccions químiques presents. L'ànode és una base de grafit a la que se li afegeix el corresponent òxid de metall depenent del tipus del que estiguem parlant, per exemple, òxid de cobalt. Els col·lectors de corrent transfereixen electrons alliberats pels ions de liti cap al circuit elèctric. Aquests col·lectors de corrent estan fets de coure (ànode) i alumini (càtode).

Sobre la superfície de l'ànode de grafit, en la primera càrrega, es forma una interfície d'electròlit sòlit (IES). Aquesta capa prima d'electròlit alenteix l'acció de reacció i disminueix el corrent (Electropedia, 2016). La capa d'IES augmenta durant el cicle de vida de la bateria, de manera que disminueix la quantitat de càrrega que aquesta pot emmagatzemar fins que aquesta deixa de ser útil. Figura 5.

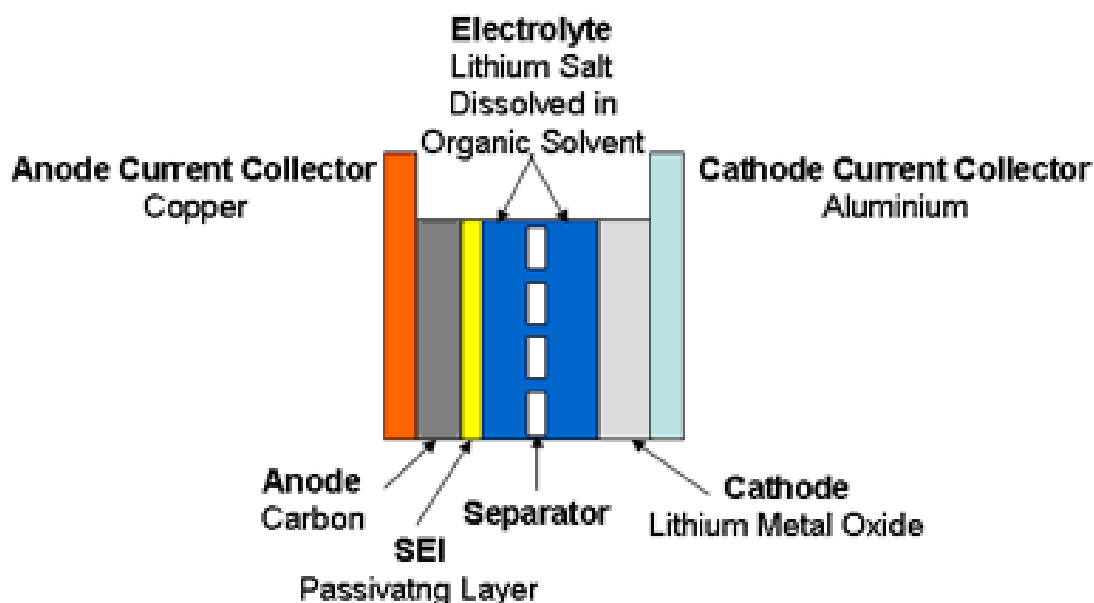


Figura 5. Estructura bàsica d'una bateria d'ions de liti (Font: Electropedia, 2016)

En l'electròlit hi ha ions de liti i aquests s'insereixen entre l'enreixat de l'estructura cristal·lina que forma l'ànode de grafit, sense modificar-la. Els elèctrodes (ànode i càtode) tenen una estructura cristal·lina que permet la inserció o extracció dels ions. Per aquesta raó, quan el circuit extern es tanca i deixa passar els electrons, els ions presents a l'ànode alliberen electrons que es transporten al càtode on hi ha una manca d'aquests, fent possible el pas de corrent elèctric.

Aquestes bateries es poden carregar sense necessitat d'estar totalment descarregades sense que afecti la seva longevitat i es poden aconseguir altes densitats d'energia, però són molt sensibles a la temperatura i les descàrregues completes.

5.1.3. Bateria de níquel i hidrur metàl·lic

Aquestes s'utilitzen en vehicles elèctrics, però especialment en els híbrids (Bosch, p. 1135). El principi de funcionament de les cel·les NiMh és possible gràcies als metalls, que poden absorbir grans quantitats d'hidrogen. Els hidrurs proporcionen un mètode d'emmagatzematge d'hidrogen, que pot reaccionar dins la cel·la. Aquests hidrurs de metall són utilitzats com elèctrode negatiu, mentre que l'elèctrode positiu està fet d'hidròxid de níquel. L'electròlit pot absorbir hidrogen també i, com en les cel·les de les bateries d'ions de liti, l'electròlit no pren part en les reaccions químiques. La seva utilitat és la de transportar hidrogen entre els elèctrodes, com es veu en la Figura 6.

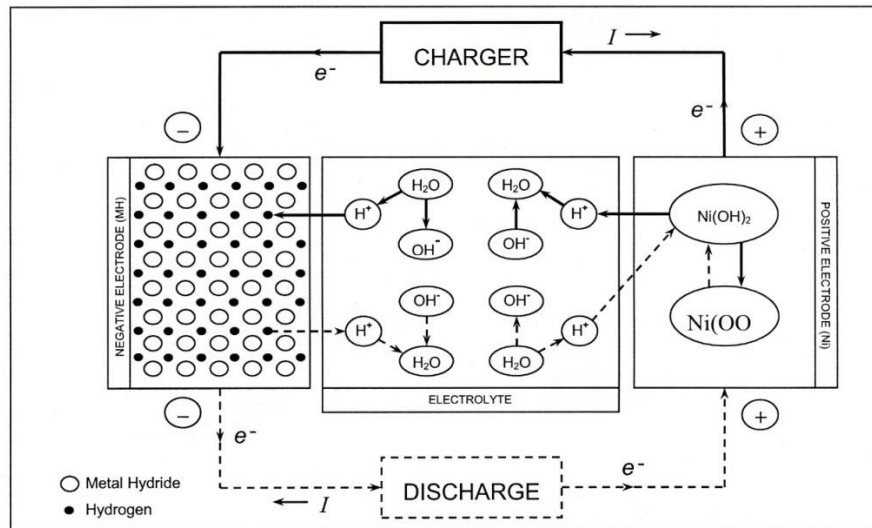


Figura 6. Estructura bàsica d'una bateria de níquel i hidrur metàl·lic

(Font: Electropedia, 2016)

El principal desavantatge d'aquest tipus de bateries és la baixa densitat energètica que presenten (fins als 80kWh/kg) comparat amb bateries amb característiques similars d'ions de liti, com es compara a la Taula 2, (aquestes segones poden arribar a tenir un 50% més de densitat energètica que les de níquel i hidrur metàl·lic) (Bosch, p.1135).

Els avantatges que presenten aquestes bateries són un cicle de vida més llarg que les d'àcid de plom tot i tenir la resta de característiques similars, com és el cas de l'energia específica o l'eficiència que es poden veure a la Taula 2.

5.1.4. Comparació de bateries

Com ja s'ha esmentat en els capítols precedents, les bateries d'ions de liti es considera que són la millor solució pels vehicles elèctrics, almenys quan ens focalitzem en aconseguir el màxim rang de funcionament i el cicle de vida útil més llarg. De totes maneres, les bateries de níquel i hidrur metàl·lic encara s'utilitzen en el món de l'automòbil en cotxes de combustió interna convencionals com a bateries d'arrancada ja que es necessita un curt període de funcionament, per tant, no és important el rang d'energia que pot subministrar sense recarregar-la, i són una opció econòmica.

A continuació es mostra una taula resum d'algunes de les característiques més importants de les bateries, la informació i taules consultades per complimentar-la es troben a l'annex 7.

Taula 2. Comparació dels tipus de bateries anteriors (Font: taula resum pròpia)

Especificacions	Bateries d'àcid-plom	Bateries de níquel i hidrur metàl·lic	Bateries d'ions de liti
Energia específica (Wh/kg)	30-40	30-80	160
Tolerància a la sobrecàrrega	ALTA	BAIXA	BAIXA
Rati d'auto descàrrega	5%	30%	<5%
Tensió nominal	2	1,2	3,7
Cicles de vida útil (80% DoD)	200-300	300-500	500-2000
Temperatura de càrrega (°C)	-20-50	0-45	0-45
Eficiència	50%-70%	66%	99,9%

L'objectiu d'aquest projecte no és trobar un nou model de bateria, sinó treballar amb un d'existent. Això porta a plantejar la qüestió: quin tipus és el més utilitzat i comú en la indústria de l'automoció?

La resposta és que les bateries més utilitzades són les d'ions de liti. Això es degut a que l'eficiència és més alta respecte la resta de bateries disponibles al mercat, i el percentatge d'auto descarrega és molt baix, això les fa fiables, ja que si es vol conduir un vehicle elèctric és desitjable que després d'un cert temps parat la bateria no hagi disminuït o, fins i tot, s'hagi descarregat i per tant el cotxe quedi inutilitzable. Per altra part, una característica dels vehicles és el pes, el qual es busca disminuir-lo tant com sigui possible. Com la densitat energètica de les bateries d'ions de liti és la més alta d'entre les comparades en la Taula 2 (taules consultades pel resum disponibles a l'annex 7), permet l'emmagatzematge de més energia amb bateries més lleugeres, aportant menys pes al vehicle que mòduls que utilitzin altres tecnologies de funcionament. (Movilidadelectrica.com, 2015).

Per altra banda, no s'han d'oblidar els inconvenients que encara presenten i s'han de tractar. Aquests mòduls són molt sensibles a les altes temperatures, fet que obliga a tenir un molt bon sistema de refrigeració per assegurar-ne el bon funcionament. Per altra banda, ofereixen un baix nombre de cicles de vida útils, això porta a haver de canviar-les ens períodes d'entre 2-3 anys incrementant el preu del manteniment del vehicle considerablement.

5.2. Mètodes de transferència de calor

Es considera que hi ha tres tipus principals d'intercanvi de calor. Un d'ells és la conducció tèrmica, l'altre és la convecció, que es pot dividir en convecció natural o forçada si hi ha alguna mena de dispositiu com un ventilador que incrementa la velocitat de l'aire per, d'aquesta manera, incrementar la velocitat d'intercanvi de calor, i per últim hi ha la radiació tèrmica. (Bosch, p. 86). Tots aquests tipus es veuen representats en la Figura 7.



Figura 7. Representació dels tipus d'intercanvi de calor (Font: geo.mtu.edu, 2017)

La conducció és l'intercanvi de calor que ocorre entre substàncies o cossos en contacte. Quan un àtom excitat enèrgicament per la temperatura, dona part d'aquesta energia als àtoms adjacents i així successivament. L'habilitat de transmetre energia tèrmica es descriu com la conductivitat tèrmica. Es representa amb la lletra λ i les seves unitats són $\frac{W}{m \cdot K}$. Les substàncies que condueixen bé l'electricitat acostumen a ser bones conductores de la calor també, i tenen un valor de λ .

L' Eq. 4 representa el rati de flux de calor Φ en situacions de conductivitat tèrmica:

$$\Phi = \lambda \cdot A \cdot \frac{T_H - T_C}{d} \quad \text{Eq. 4}$$

(Puranen, p. 14-15)

On:

T_H és la temperatura del material en contacte amb la font de calor (K)

T_C és la temperatura del material al costat més allunyat de la font de calor (K)

A és l'àrea de la secció transversal de material que està conduint la calor (m^2)

d és l'amplada del material en la direcció de la transferència de calor (m)

La convecció consisteix en la transferència de calor entre una superfície sòlida i un medi líquid o gasós. Aquest tipus de transferència pot ser natural o forçada. La convecció forçada és aquella en la que una força externa incrementa la velocitat del flux, de gas o líquid, i per aquesta raó es transfereix més calor en el mateix temps. Com la conductivitat, la convecció també es descriu quantitativament amb el coeficient de transferència de calor convectiu α . Les unitats d'aquest coeficient són $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$. L'equació que descriu el rati de flux de calor per convecció és la següent:

$$\Phi = \alpha \cdot A \cdot (T_H - T_C) \quad \text{Eq. 5}$$

(Puranen, p. 16-17)

El problema amb aquest model és que no hi ha una llei o teoria matemàtica que doni el valor correcte d' α per qualsevol situació. Aquest coeficient depèn de moltes variables, com la densitat de la substància que flueix, la viscositat d'aquesta, la conductivitat tèrmica, la calor específica o la velocitat. A la vegada, aquestes característiques poden canviar en el temps per la influència, per exemple, de la temperatura canviant durant el dia. El coeficient també depèn de la geometria de la superfície sòlida i la rugositat, ja que aquests aspectes tenen un impacte en el comportament del flux. Com quantificar aquest valor és tan complicat i difícil de generalitzar, doncs cada aplicació és única i

diferent a la resta existents, no se li pot donar un valor constant per a totes les aplicacions. Normalment, es calcula experimentalment. Tot i així sí que es poden fer estimacions basades en l'experiència prèvia de sistemes similars. Aquesta informació es troba a la Taula 3.

Taula 3. Estimació de la magnitud del coeficient de transferència de calor α (Font: Puranen, p.17).

SITUACIÓ	INFORMACIÓ ADDICIONAL	α $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$
Convecció natural amb flux gasós	Flux de gas creat per la diferència de temperatures pròximes a la superfície del sòlid.	2-25
Convecció natural amb flux líquid	Flux de líquid creat per la diferència de temperatures pròximes a la superfície del sòlid.	50-1000
Convecció forçada amb flux gasós	Flux of gas pròxim a la superfície del sòlid creat, per exemple, per un ventilador.	25-250
Convecció forçada amb flux líquid	Flux de líquid pròxim a la superfície del sòlid creat, per exemple, per una bomba d'aigua.	50-20.000

Tot i que el coeficient de transferència de calor es pot determinar experimentalment, també existeixen fórmules correlatives, basades en patrons experimentals. Aquestes fórmules proporcionen paràmetres adimensionals, les característiques de flux i calor dels quals es poden determinar fàcilment sense haver de fer una prova experimental. Un dels punts negatius és que aquestes fórmules es poden complicar molt i tan sols són aplicables per geometries concretes i simples. De totes maneres, sí es poden fer servir per l'objectiu de càlcul d'aquest projecte, ja que la secció d'intercanvi de calor és un rectangle i, per tant, una geometria senzilla.

El numero de Nusselt és el paràmetre adimensional més important per al càlcul del coeficient de transferència de calor per convecció, doncs n'és una de les variables.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad \text{Eq. 6}$$

(Bosch, p. 89)

On:

L és la dimensió característica del sòlid. Llargada si es tracta d'una placa simple, o el diàmetre interior si es treballa amb un sistema de tubs (m)

$\lambda \approx 0,02588 \frac{W}{m \cdot K}$ (per aire a 20°C) és la conductivitat tèrmica del líquid o gas que flueix

També s'ha comprovat que el número de Nusselt es pot determinar com a funció del nombre de Reynolds i el nombre de Prandtl per a convecció forçada, que és el cas a estudiar. En altres paraules, l'habilitat de transmetre calor està relacionada amb la geometria, velocitat de flux i les propietats del fluid, com la densitat, viscositat i capacitat de calor específica, moltes de les quals també estan altament condicionades per la temperatura. (Bosch, p. 89).

El nombre de Reynolds descriu la relació entre les forces de pressió i fricció del flux i es defineix amb l'Eq. 7:

$$Re = \frac{c \cdot L}{\nu} \quad \text{Eq. 7}$$

(Puranen, p. 23)

On:

c és la velocitat del flux (m/s)

ν (lletra grega nu) és la viscositat cinemàtica del gas o líquid $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

Pr és una variable únicament dependent de la substància i es defineix de la següent forma:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad \text{Eq. 8}$$

On:

a és la difusivitat tèrmica i descriu la relació entre la transferència de calor i la capacitat d'emmagatzematge de calor $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

En aquest cas, el càlcul del nombre de Prandtl o de la difusivitat tèrmica és irrellevant, ja que, pels gasos que treballen a pressions inferiors a 10bar, aquest valor adimensional s'estima de $Pr = 0,7282$. (Bosch, p. 89).

Per a casos concrets de geometries simples i convecció forçada, el número de Nusselt es pot calcular a partir d'equacions dependents dels nombres de Reynolds i Nusselt.

Per exemple, per plaques treballant en condicions de convecció forçada de longitud L , temperatura constant i flux laminar, el nombre de Nusselt mitjà Nu_{∞} per tota la llargada L de la placa és (Bosch, p.89):

$$Nu_{\infty} = 0.664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad \text{Eq. 9}$$

Amb aquest resultat, es pot calcular el coeficient de transferència de calor substituint-lo a l'Eq. 6.

Pel mateix cas, però sota l'efecte d'un flux turbulent, tenim que (Bosch, p.89):

$$Nu_{\infty} = 0.037 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \quad \text{Eq. 10}$$

Com es pot deduir, en l'aplicació del projecte, la refrigeració per transferència de calor per convecció dels mòduls de bateries es realitza principalment per convecció forçada i utilitzant un flux d'aire. També en menor mesura, per conducció des de les bateries a través de les cobertes de la bateria o mòdul.

La tercera forma de transferència de calor és la radiació. Segons la llei d' Stefan-Boltzmann, la radiació tèrmica depèn de l'àrea de superfície A , l'emissivitat de la superfície ϵ , la temperatura, i la constant d'Stefan-Boltzmann $\sigma \approx 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$.

Totes aquestes variables es combinen en l'Eq. 11 per determinar el flux.

$$\Phi = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad \text{Eq. 11}$$

On:

ϵ és l'emissivitat, relació entre la radiació emesa per un cos comparada amb la radiació d'un cos negre amb les mateixes característiques físiques

$\sigma \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ és la constant d'Stefan-Boltzmann

A és l'àrea de la superfície (m^2)

T és la temperatura de la superfície (K)

L'efecte de la temperatura sobre el flux tèrmic total és de la potència a la quarta. Això implica que l'efecte de transferència de calor per radiació tèrmica en temperatures molt baixes o diferències de temperatures petites és, en molts casos, menyspreable. L'emissivitat descriu l'habilitat d'un cos d'irradiar (cos amb més emissivitat és el cos negre amb $\epsilon = 1$) o de reflectir (cos que reflecteix totalment implica $\epsilon = 0$). Per tant, en aplicacions on el cos radiant és de dimensions petites, té poca emissivitat o la temperatura a la que es troba és baixa, l'efecte de transmissió de calor per radiació es pot negligir sense afectar els resultats dels càlculs en gran mesura. (Bosch, p. 90).

5.3. Generació de calor en les bateries

Les bateries generen calor de dues maneres diferents. La primera es regeix per la llei de Joule. És un fet que totes les bateries tenen, al menys, resistència interna. Quan el corrent flueix per aquesta resistència interna, tant en el procés de càrrega com en el de descàrrega, aquesta energia dissipada es transforma en calor. Com la quantitat de calor també es pot descriure en termes de potència P , la quantitat de calor Q es pot reescriure com a funció del corrent al quadrat multiplicat per la resistència interna de la bateria:

$$Q = I^2 \cdot R \quad \text{Eq. 12}$$

On:

Q és la calor generada en un instant (J)

I és la intensitat del corrent que circula pel circuit de la bateria (A)

R és la resistència interna de la bateria (Ω)

Si el corrent és constant per un cert període de temps, el rati de flux de calor es pot quantificar de la següent manera:

$$\Phi = \frac{Q}{t} = \frac{I^2 \cdot R}{t} \quad \text{Eq. 13}$$

(Pesaran & Keyser, p. 2)

On:

Φ és el flux de calor ($\frac{W}{s}$)

t és el temps (s)

Durant la descàrrega, l'increment de temperatura de la bateria està limitat, ja que l'energia total del sistema està lligada amb la quantitat d'energia emmagatzemada pels mòduls d'aquesta. Com es pot imaginar, com més gran sigui la capacitat d'emmagatzematge de la bateria, major serà la quantitat de calor generada per aquesta. Tot i així, pot passar que apareguin punts localitzats d'altres temperatures.

Durant la càrrega, els riscos de sobreescalfament són alts, ja que no hi ha un límit automàtic que eviti que l'usuari continuï carregant d'energia la bateria tot i que estigui gairebé en el seu límit de càrrega. (Electropedia, 2016).

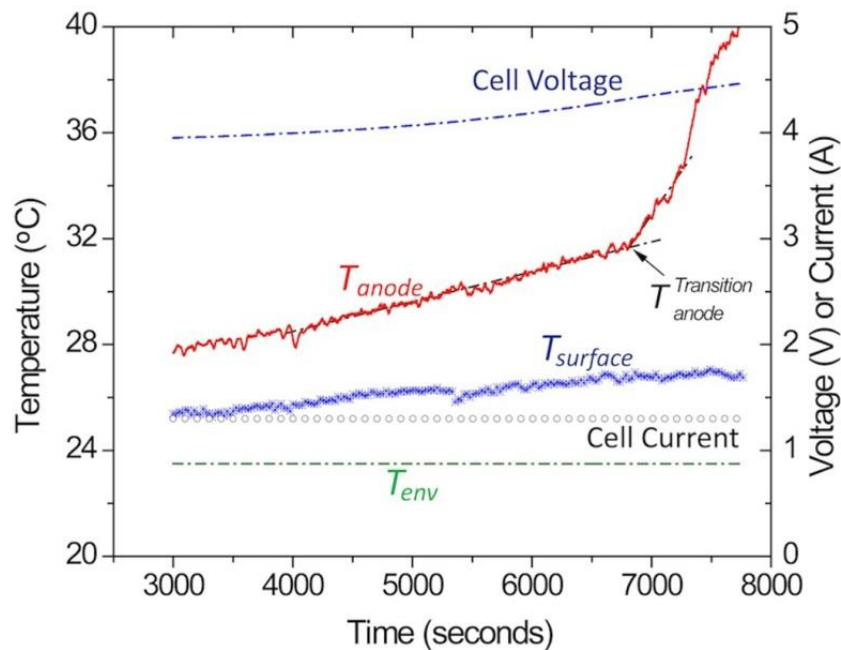


Figura 8. Generació de calor en una bateria durant la seva utilització (Font: SPIE, 2013)

En vermell apareix la temperatura de l'ànode d'una cel·la d'ions de liti amb una capacitat de 2,6Ah sota l'efecte d'una càrrega constant. També es poden veure les condicions de temperatura ambiental, temperatura a la superfície, corrent elèctric i voltatge de la cel·la sota les que està treballant la cel·la en el moment de prendre les mesures de l'experiment.

Aquesta temperatura augmenta linealment, però en un cert punt hi ha un salt bruscat de temperatura i aquest coincideix amb el punt de sobrecàrrega de la bateria. És a dir, la bateria, en estar carregada totalment, dissipa tota l'energia en forma de corrent elèctric que rep en forma de calor augmentat així bruscament la temperatura de l'ànode. Fet que pot suposar el deteriorament prematur de la bateria per l'efecte que aquesta té sobre la vida útil dels mòduls de les bateries que funcionen amb la tecnologia d'ions de liti.

Tot i que aquest gràfic representi la importància de monitoritzar i controlar la temperatura en l'ànode, la seguretat de les bateries existent avui en dia es basa en el

control per sensors de la temperatura de la superfície de les bateries. Però la inèrcia de la cel·la pot causar que la temperatura de la superfície es desviï notablement respecte la de l'ànode, especialment en canvis ràpids de la temperatura ambiental. I això resulta en un risc per la seguretat de les operacions de les bateries amb tecnologia d'ions de liti.

La segona forma de dissipació de calor és l'anomenada escalfament o refrigeració termoquímica. Això significa que durant la càrrega o la descàrrega de la bateria, les reaccions químiques que prenen lloc dins les cel·les d'aquesta, generen (si són reaccions exotèrmiques) o absorbeixen (si són endotèrmiques) calor. Per tant, si les reaccions exotèrmiques passen conjuntament amb la llei de Joule, és molt probable que apareguin problemes de sobreescalfament del mòdul. Com les reaccions químiques de càrrega i descàrrega són reversibles, les reaccions exotèrmiques durant la càrrega es converteixen en endotèrmiques durant la descàrrega i a la inversa. Per aquesta raó, aquest problema no es pot evitar. Normalment, l'efecte Joule és molt major a l'absorció de calor conseqüència de les reaccions químiques endotèrmiques, i per aquesta raó es necessiten sistemes de refredament externs que mantinguin la temperatura de la bateria controlada sota un barem apropiat pel tipus de mòduls amb els que es treballa. (Electropedia, 2016)

Les condicions ambientals també tenen un efecte sobre la temperatura de les bateries. En ambient amb temperatures baixes, la bateria perdrà calor per conducció, convecció i radiació. Com les baixes temperatures afecten negativament a les capacitats elèctriques de les cel·les, els mòduls de les bateries haurien d'estar aïllats tèrmicament respecte l'exterior i s'hauria d'instal·lar, també, un sistema que escalfi les bateries si és necessari. Per altre costat, en ambients amb altes temperatures, les bateries guanyaran temperatura dels seus voltants, fet que no és gens positiu ja que es sap que les altes temperatures afecten el funcionament i la vida útil dels mòduls, Taula 2.

6. Sistemes de gestió de bateries de vehicles elèctrics

Com ja s'ha mencionat anteriorment, el procés d'envelliment de moltes de les tecnologies de bateries conegudes depèn fortament de la temperatura. Per aquesta raó el sobreescalfament és un problema que s'ha de solucionar amb sistemes de refrigeració externs convenients en cada cas. Aquests sistemes tenen la funció d'assegurar que la temperatura de les bateries no incrementa per damunt d'un valor que posi en risc el seu funcionament. Això es pot fer amb sistemes de refrigeració que utilitzen líquids com aigua o altres refrigerants químics com el R134a, treballant en un cicle de compressió o sistemes de refrigeració per convecció d'aire.

Les temperatures extremadament baixes, per altre costat, alenteixen les reaccions químiques que tenen lloc i fan que les bateries no treballin sota el punt de treball més eficient.

Per totes les raons exposades anteriorment, la temperatura d'operació de les bateries s'hauria de mantenir entre els 20°C i els 40°C. (Bosch, p. 1141).

El sistema de manteniment de les bateries mesura el corrent que circula per la bateria, temperatura de les cel·les, el voltatge de cada cel·la individual, de cada mòdul individual i de la bateria en la seva totalitat. D'aquestes variables, la unitat de manteniment pot determinar l'estat de càrrega (SOC) i l'estat de salut (SOH) de la bateria. A partir d'aquestes es pot definir la bateria restant disponible i el corrent permès. Aquest sistema preveu la sobrecàrrega de les cel·les, ja que aquests aspectes tendeixen a causar danys irreversibles i envelliment prematur de la bateria. Però la sobrecàrrega és especialment dolenta quan es treballa amb mòduls d'ions de liti ja que pot passar un sobreescalfament com es veu en la Figura 8. (Bosch, p. 1139).

6.1. Sistemes de refrigeració

A continuació, es presenten sistemes construïts en alguns dels vehicle elèctrics més coneguts actualment i, posteriorment, es presenta el sistema escollit en aquest projecte per ser estudiat, a més de fer-ne una explicació del seu funcionament.

6.1.1. Principi de funcionament dels sistemes de refrigeració

El funcionament d'aquest sistema de refrigeració té el seu fonament en un cicle termodinàmic tancat. Quan el líquid del sistema refrigerant es converteix en gas a l'evaporador, aquest absorbeix calor del seu voltant, és a dir, de la bateria. Quan aquesta calor necessària per al canvi de fase és absorbida, l'efecte de refrigeració desitjat ja s'ha aconseguit. El refrigerant, llavors, transfereix aquesta calor cap a una font apropiada, normalment l'ambient, on no provoca un increment de temperatura important. A la Figura 9 es mostren els components i estructura d'un sistema de refrigeració tancat, d'una bateria.

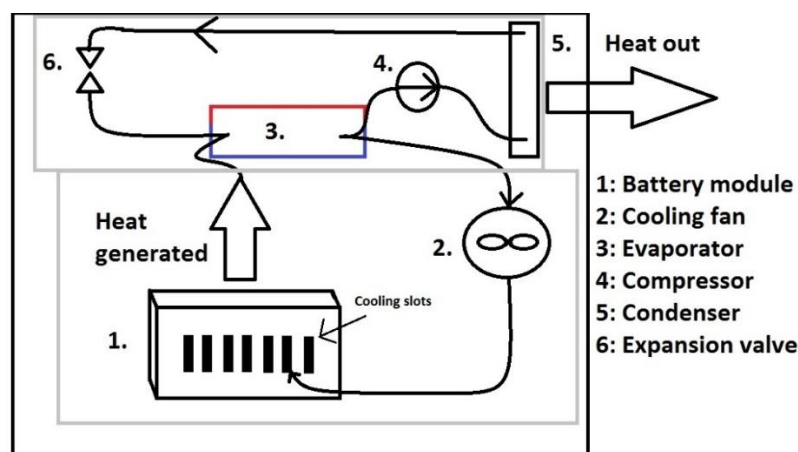


Figura 9. Components bàsics d'un sistema de refrigeració (Font: dibuix propi)

El sistema consisteix de dos conjunts units posteriorment: la bateria i el conjunt del ventilador per un costat, i per l'altre es té el conjunt del sistema refrigerant per líquid. Ambdós estan separats i aïllats l'un de l'altre.

El funcionament d'aquest conjunt és el següent:

- La calor es genera dins el mòdul de la bateria, component 1.
- El ventilador, component 2, bufa aire fred a través de les ranures dels mòduls de la bateria.
- La calor es conduïda a l'ambient per convecció forçada.
- L'aire que entra al mòdul està a una temperatura inferior a la d'aquest, T_c mentre que l'aire a la sortida del conjunt 1 està a, aproximadament, la mateixa temperatura que el mòdul quan està a la temperatura desitjada, T_h .
- Aquest aire calent és conduït a través de l'evaporador, component 3, o bescanviador de calor, que absorbeix la calor.
- L'aire fred retorna al ventilador i comença el cicle de nou, si es tracta d'un circuit tancat, com en la Figura 9.

Si el sistema és un circuit obert:

- L'aire que bufa el ventilador és agafat de l'ambient.
- Aquest circula per les ranures dels mòduls de la bateria.
- L'aire calent que en surt és transferit a l'ambient un altre cop.

En el cas que la temperatura de l'aire de l'ambient sigui molt alta, o massa alta per l'aplicació concreta (aquest valor cal fixar-lo en cada cas), aquest hauria de ser refrigerat abans d'arribar a la bateria, per un sistema de refrigeració, basat amb el mateix funcionament que l'explicat anteriorment.

Dins el conjunt 2, el conjunt del sistema de refrigeració, hi ha 4 components principals: l'evaporador (3), el compressor (4), el condensador (5) i la vàlvula d'expansió (6).

El sistema es plena de refrigerant (un de molt comú és el R134a), que té les propietats termodinàmiques d'evaporar-se i condensar-se a pressions i temperatures desitjades, ja que són fàcils d'aconseguir en les condicions de treball d'una bateria.

Prenent com a referència la Figura 26 de l'annex 4, el cicle de compressió que aquest segueix per una temperatura de -20°C (és la temperatura a la que es troba el refrigerant a aproximadament pressió normal, 1atm) és:

- El compressor és alimentat, per l'evaporador, amb refrigerant en forma de gas a una pressió aproximada de 1,3bar. Aquest gas es posa a alta pressió augmentant, al mateix temps, la temperatura. Aquesta pressió pot arribar a un màxim d'aproximadament 40bar, però el producte estaria treballant pròxim al punt crític de la substància fet no recomanable.
- El refrigerant en forma de gas és conduït al condensador on transmet calor a l'ambient i això provoca que el refrigerant passi de gas a la forma líquida un altre cop per tant, hi ha un canvi de fase a temperatura constant.
- Del condensador, aquest líquid és conduït a la vàlvula d'expansió, que regula la quantitat de refrigerant permès per circular a través de l'evaporador. Quant el líquid entra a l'evaporador, la pressió disminueix i el volum específic incrementa, al mateix temps, la temperatura torna a disminuir a la inicial.

Com s'ha esmentat anteriorment, l'aire escalfat per la bateria és conduït per la xarxa metàl·lica de l'evaporador. Les parets metàl·liques i fredes d'aquest condueixen la calor de l'aire cap al refrigerant líquid. L'absorció de calor de l'aire és tan important que fa que el refrigerant canviï de fase un altre cop a gas. Aquest gas a baixa pressió torna a ser conduït cap al compressor i el cicle comença un altre cop.

6.1.2. Sistemes de vehicles elèctrics existents

Aquest apartat serveix per introduir la idea de l'aplicació de sistemes de refrigeració en bateries de vehicles elèctrics amb exemples reals de cotxes que estan actualment al mercat. A partir d'aquestes aplicacions es pot entendre millor la necessitat d'aquests sistemes així com trobar punts o idees comunes en les construccions d'aquests.

6.1.2.1. TESLA

El primer model a presentar és el de les bateries dels vehicles elèctrics Tesla S. Aquests cotxes es consideren vehicles elèctrics d'alta gamma.

El sistema de gestió tèrmic dels vehicles Tesla, igual que dels vehicles GM, utilitza glicol líquid com a refrigerant, aquest és similar a l'utilitzat en el sistema de refrigeració dels motors dels vehicles convencionals de motor de combustió interna. Tant els sistemes dels cotxes GM com els Tesla transfereixen calor cap a un cicle de refrigeració i utilitzen un sistema de calefacció per a ambients freds basat en resistències elèctriques. El glicol es distribueix per tot el mòdul per refrigerar les cel·les, com es veu en la Figura 10.

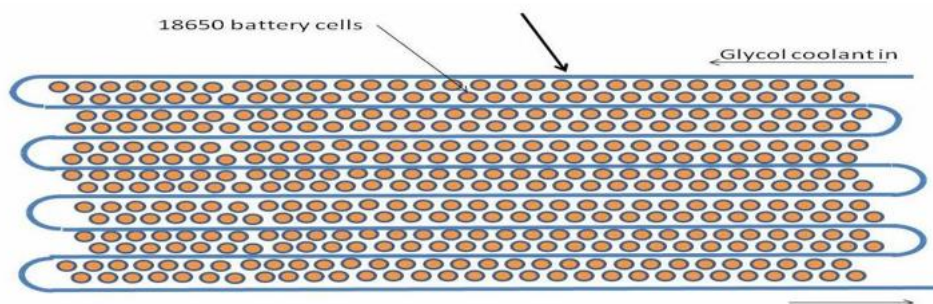


Figura 10. Sistema de refrigeració de les bateries de VEs Tesla (Font: Insideevs, 2016)

Considerant que una bateria d'un vehicle Tesla té 7.000 cel·les similars, en dimensions, a les bateries AA, és tot un desafiament de refrigerar.

6.1.2.2. General Motors

A General Motors utilitzen cel·les rectangulars. Cada cel·la, rectangle blau fosc de la Figura 11, és aproximadament de 200x30mm, per tant, són considerablement més grans que les utilitzades en els Tesla.

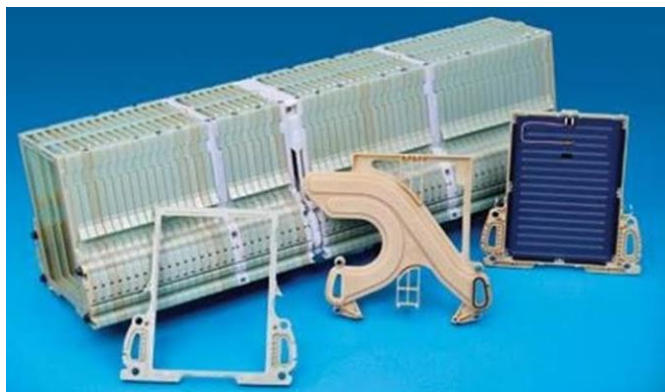


Figura 11. Sistema de refrigeració de les bateries de VEs GM
(Font: insideevs.com, 2015)

Entre dues cel·les sempre es troba una placa refrigerant d'alumini, a la Figura 12, es veuen els cinc conductes individuals de refrigerant que circulen paral·lelament en cada una d'aquestes plaques d'alumini. La diferència amb els Tesla és que els conductes de refrigerant estan disposats en sèrie en aquests segons vehicles.

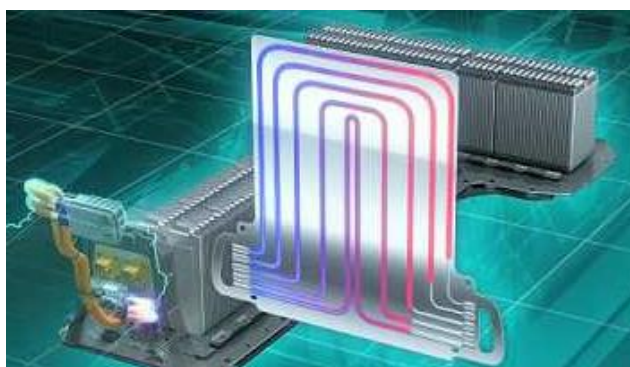


Figura 12. Secció transversal de les plaques refrigerats d'alumini (Font: gm-volt, 2017)

Cada una d'aquestes cel·les està allotjada en un marc de plàstic i els marcs de les plaques refrigerants es disposen de manera longitudinal de manera que es forma el paquet sencer.

6.1.2.3. BMW

Els vehicles BMW tenen un disseny únic pel que fa a la bateria. El paquet consisteix en 8 mòduls, com es veu en la Figura 13, i cada un d'ells conté 12 cel·les. Aquests són connectats en sèrie per crear un paquet de 360V. Això fa més fàcil el reemplaçament d'un sol mòdul si està danyat, enlloc d'haver de canviar la bateria sencera.

El fabricant BMW utilitza un fort adhesiu per segellar el paquet de mòduls d'ions de liti al seu llocs.

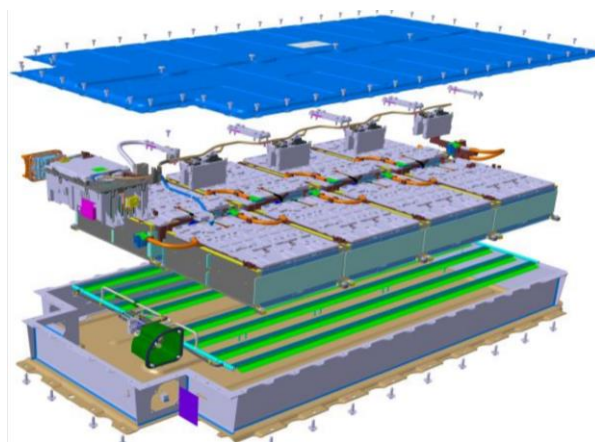


Figura 13. Sistema de refrigeració de les bateries dels VEs BMW

(Font: Wiki.aalto, 2014)

Aquest adhesiu també segella els tubs del sistema de refrigeració que circula per la part inferior dels mòduls, tubs verds en la Figura 13. Aquest sistema de refrigeració és, a diferència de la disposició dels mòduls de la bateria, senzill i efectiu.

Les bateries dels BMW són especials comparades amb la resta, doncs el conjunt també aporta suport estructural a l'estructura del cotxe, treballant a estrès. (Hybridcars.com, 2016)

6.1.2.4. FORD

Segons el cap d'enginyeria de Ford, Gilbert Portalatin, les proves dels programes de trens de potència elèctrics i integrats es fan a les temperatures extremes de -35°C i 82°C .

En els seus models, tan sols s'utilitzen ventiladors com a sistema refrigerant, depenent tan sols d'un sensor que monitoritza la temperatura de diferents compartiments de la bateria, com s'aprecia a la Figura 14, no hi ha un sistema de refrigeració amb refrigerant líquid per refredar l'aire, sinó que hi ha una entrada i sortida d'aire. Aquest aire, s'aprofita del sistema de refrigeració de l'interior del vehicle de manera que, en ambients càlids, s'utilitza l'aire proporcionat als ocupants del cotxe per refrigerar la bateria i en ambients frescs, l'aire calent juntament amb el procés de generació de calor pel funcionament de la bateria.

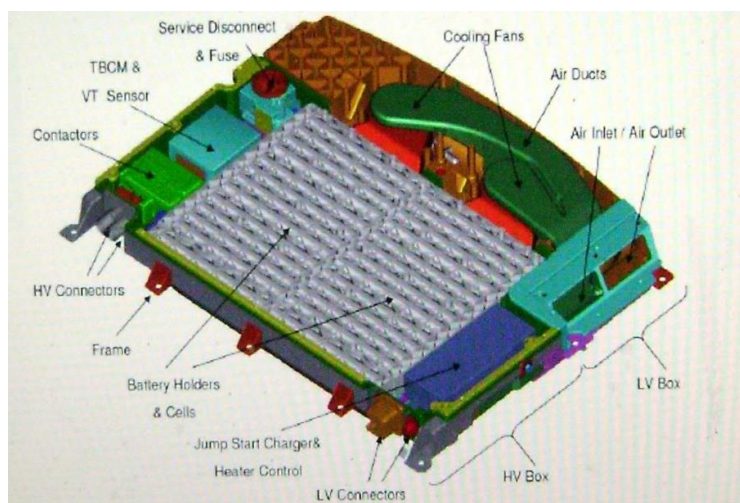


Figura 14. Sistema de refrigeració de les bateries dels VE Ford

(Font: articles.sae.org/11705)

Ford utilitza estratègies de control per mantenir la temperatura de les cel·les entre 0 i 45°C per a un rang de conducció màxim. Si la temperatura del paquet és més baixa (com passa en la majoria de països europeus durant els mesos d'hivern) que el mínim donat en aquest rang, el motor funcionarà amb potència reduïda fins que les cel·les s'escalfen amb la circulació de corrent elèctric entre el generador i la bateria.

6.1.2.5. NISSAN

Els vehicles elèctrics de Nissan, com el Nissan Leaf, tenen una disposició completament diferent del sistema de refrigeració de les bateries respecte els seus competidors.



Imatge 1. Sistema de refrigeració de les bateries dels VEs NISSAN

(Font: motorpasionfuturo.com, 2013)

El paquet de la bateria es situa sota els seients darrers del cotxe i es refrigera amb aire de manera passiva. Això significa que la refrigeració es du terme tan sols amb el moviment del vehicle, de manera que el flux d'aire flueix pels compartiments de la bateria. Per tant, la calor no es transferida fora del paquet de mòduls quan es carrega, fet que pot causar l'envelliment prematur de la bateria. Naturalment, la temperatura de l'ambient té un efecte importat en el rang i comportament de la bateria. Per aquesta raó, quan es condueix a temperatures ambientals altes (com podria ser en els països del sud d'Europa durant els mesos d'estiu) el sistema de gestió de la bateria hauria d'assegurar que el subministrament de corrent elèctric a la bateria para si l'efecte refrigerant del cotxe en moviment no és suficient per disminuir la temperatura d'aquesta.

6.1.3. Comparació de les bateries existents

A partir de les bateries dels vehicles elèctrics comentats en els apartats anteriors, s'ha fet una taula resum amb les característiques més rellevants d'un vehicle i de la bateria elèctrica d'aquest. La taula resum és la Taula 13 que es troba a l'annex 5.

D'aquesta se'n pot veure que, en general, els fabricants d'automòbils elèctrics es centren en la fabricació de vehicles amb bateries d'entre 20 i 35kWh, les quals tenen una autonomia de no més de 300km en els millors casos. La raó de la venda de vehicles amb bateries de tan poca capacitat n'és el preu. Les bateries elèctriques poden arribar a suposar un terç del preu final del vehicle i els fabricants necessiten cotxes econòmicament competitius als vehicles de combustió interna convencionals. Com la diferència, en preu, més remarcable entre aquests dos tipus de vehicles és el motor que els impulsa, és important minimitzar el cost de les bateries, i una manera és reduint-ne la capacitat.

Per altra banda, també es pot veure que hi ha dos tipus de marques, les més econòmiques, que utilitzen bateries de capacitat més reduïda, i les d'alta gamma com són General Motors i Tesla. Els cotxes d'aquestes marques tenen bateries elèctriques d'a partir de 60kWh, capacitats molt superiors que les màximes que manipulen els altres fabricants. En aquests casos, la capacitat d'acceleració i velocitat màxima dels vehicles s'equiparen a les característiques dels vehicles convencionals. Tot i això, l'autonomia segueix sent molt menys que la dels cotxes moguts per combustibles fòssils. Per tant, es pot veure que aquesta característica de les bateries és una variable de disseny important per millorar en les bateries del futur si es vol que aquests vehicles siguin interessants per als compradors.

Pel que fa als preus dels mòduls, no ha estat fàcil aconseguir aquesta dada per algunes marques. Les més complicades han estat BMW i Nissan. El preu de les bateries és una característica que es proporciona als concessionaris a interessats en adquirir-les, però en alguns casos no s'han fet públiques. En alguns altres, com és el cas de Tesla, sí que són preus públics i, a més, de la taula es pot llegir que una bateria de Tesla amb la mateixa

capacitat que la de GM és fins 2.000€ més barata. Això és degut a que en adquirir un vehicle Tesla, i sent la marca conscient que els preus baixaran en els propers anys, el comprador pot pagar el valor la bateria de recanvi que utilitzarà uns anys més tard. Així, el consumidor sap que no tindrà una despesa extra per canviar la bateria en un futur i l'empresa, sabedora de la baixada de preu que es preveu per les bateries, treu un benefici extra que, venent-les al moment que el recanvi sigui necessari, no tindrien.

Per últim, es vol destacar el fet de la manca d'informació respecte l'eficiència de les bateries. En cap cas ha estat possible trobar aquesta variable. Això es pot deure a les mesures de confidencialitat que les empreses tenen per evitar espionatges per part d'altres. D'igual manera, és una dada que els consumidors no pregunten, doncs estan més interessats en conèixer l'autonomia, la velocitat màxima i, sobretot, el preu que en saber les característiques de disseny dels motors dels seus vehicles.

7. Caracterització de la bateria

Per la realització del treball es necessita la caracterització del mòdul amb mides i altres assumpcions a partir de les quals es basen els càlculs posteriors.

- Primer de tot cal dimensionar la bateria a partir de la qual es desenvolupa el treball. Aquesta serà una bateria d'ions de liti amb les mides següents:

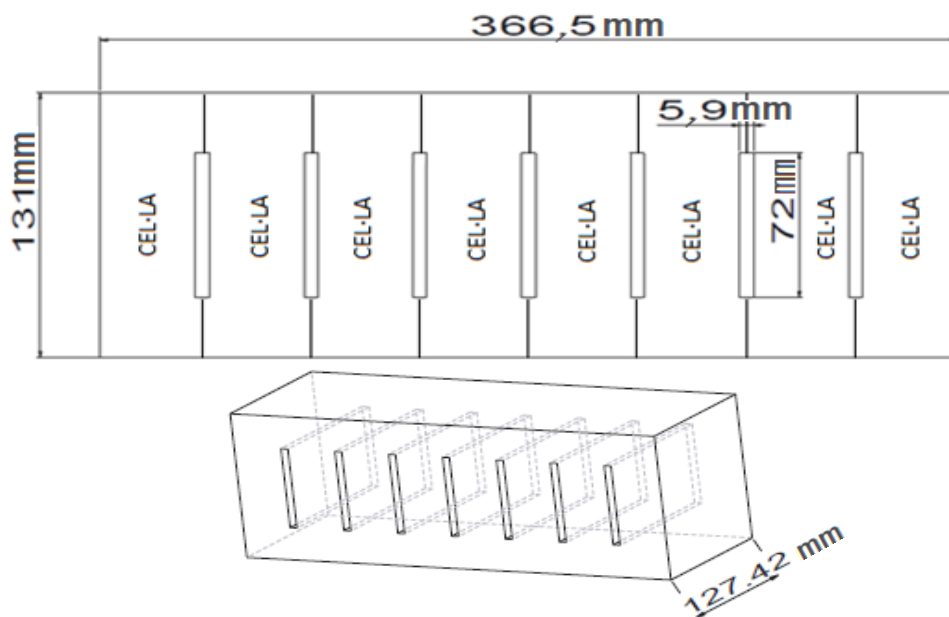


Figura 15. Dimensions de la bateria (Font: esquema propi)

El mòdul complet tindrà 8 cel·les tal i com es pot veure en la Figura 15. En concret les 8 cel·les són les zones separades per les ranures de refrigeració.

Entre cada cel·la hi ha una ranura de refrigeració, que fa un total de 7. Aquestes estan simplificades respecte la bateria original a rectangles de 5,90x72,00x127,42mm.

El mòdul també està simplificat a un prisma de dimensions 131,00x366,50 com es veu a la Figura 15, amb una profunditat de 127,42mm.

Les dimensions de la bateria i les ranures destinades a la refrigeració s'han simplificat i aproximat a rectangles per tal de facilitar els càlculs d'àrees i volums. Per altra banda, existeixen fórmules correlatives que proporcionen paràmetres adimensionals (Nusselt, Reynolds, Prandtl) per calcular el coeficient de transferència de calor per convecció. Però aquestes sols són aplicables per geometries concretes i simples. Per aquesta raó s'ha aproximat la forma de les ranures a una de senzilla i la qual té una aplicació directa en aquestes fórmules.

- Una altra característica important a tenir en compte és la temperatura màxima que es considera que la bateria no ha de superar per assegurar-ne un bon funcionament el màxim temps possible i no avançar-ne el deteriorament. A la Taula 4 es veu una comparació dels rangs de temperatura més segurs durant el procediment de càrrega de les bateries depenent de la tecnologia que utilitza.

Taula 4. Rang de temperatura de càrrega de les bateries més utilitzades
(Font: Battery University, 2016)

Battery type	Charge temperature	Discharge temperature	Charge advisory
Lead acid	-20°C to 50°C (-4°F to 122°F)	-20°C to 50°C (-4°F to 122°F)	Charge at 0.3C or less below freezing. Lower V-threshold by 3mV/°C when hot.
NiCd, NiMH	0°C to 45°C (32°F to 113°F)	-20°C to 65°C (-4°F to 149°F)	Charge at 0.1C between -18°C and 0°C. Charge at 0.3C between 0°C and 5°C. Charge acceptance at 45°C is 70%. Charge acceptance at 60°C is 45%.
Li-ion	0°C to 45°C (32°F to 113°F)	-20°C to 60°C (-4°F to 140°F)	No charge permitted below freezing. Good charge/discharge performance at higher temperature but shorter life.

Per tant, prenent el rang de temperatures de les bateries d'ions de liti, es veu que la màxima recomanable és de 45°C, però s'ha decidit que per treballar amb un

cert rang de seguretat, la temperatura utilitzada com màxima en aquest treball serà de 5°C menys que el recomanat a la Taula 4 i és de 40°C.

- Pel que fa al sistema de refrigeració, estarà compost de dos circuits tancats i independents.

En primer lloc, es dimensionarà un ventilador que llançarà aire a través de les ranures de la bateria a la velocitat desitjada, calculada a partir de fórmules de la termodinàmica implementades en un codi MatLAB.

Aquest aire, en sortir del mòdul serà refrigerat en un bescanviador de calor que utilitza el refrigerant R134a, ja que és un dels més utilitzats i és el més conegut després de cursar les assignatures de termodinàmica de la Universitat de Lleida. Aquest refrigerant circula en un circuit tancat format per, a més del bescanviador de calor, un compressor, un evaporador i un condensador. L'aire que es refreda en el bescanviador torna a ser llançat pel ventilador, iniciant així un altre cop el cicle.

S'ha escollit que el mètode de refrigeració de la bateria seria per aire perquè després de tota la informació presentada i de l'estudi dels diferents tipus de bateries i refrigeració s'ha arribat a la conclusió que és el sistema més econòmic ja que tan sols es necessita un ventilador capaç de moure l'aire a la velocitat desitjada i es tracta d'una construcció senzilla la qual es pot dissenyar a partir de components individuals del mercat.

- Un altre punt important és determinar les condicions ambientals a les que es suposa que treballarà el sistema. En aquest cas, es considerarà que la bateria es troba en un clima mediterrani i es pren que la temperatura de l'aire del sistema de refrigeració és de 20°C ja que és la considerada normal en estudis de termodinàmica.
- L'eficiència és un valor pilar per als càlculs i el dimensionat del ventilador del sistema de refrigeració. En aquest cas s'ha considerat el valor del 90% en les

fórmules perquè és el valor mitjà d'entre les fonts consultades així doncs s'ha intentat generalitzar el dimensionament a una eficiència mitjana.

De totes maneres, també s'han calculat totes les variables per una eficiència del 80%, considerada el pitjor dels escenaris tot i que, encara que el dimensionat dels sistemes de refrigeració no coincideixen, no se n'ha fet un estudi detallat dels components del sistema de refrigeració que seria necessari.

- Pel que fa a les variables, s'han llegit de la taula adjunta en l'Annex 3 del projecte (Çengel) i aquestes són les següents:
 - Densitat: s'ha llegit la densitat de la temperatura de 30°C, que correspon al valor mig de la temperatura a la que es troba l'aire en el circuit tancat i s'ha considerat $\rho = 1,164 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.
 - Calor específica: com en el cas anterior, s'ha pres el valor per una temperatura mitjana de funcionament i és de $c_p = 1007 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$.
 - Conductivitat tèrmica: $\lambda = 0,02588 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$.
 - Viscositat dinàmica: $\mu = 1,872 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$.
 - Prandtl: aquest és un valor adimensional que relaciona la viscositat cinemàtica i la difusivitat i és de $Pr = 0,7282$.
- Una condició important per la disseny és, també, que no es vol sobredimensionar el disseny i, en cas d'haver més d'una opció viable o interessant s'escollirà sempre la que proporcioni més avantatges, com per exemple, el component menys sorollós, o que consumeixi menys energia.

Tot i que es parla dels preus de les bateries i del sistema de refrigeració utilitzat, els possibles càlculs econòmics no tindran cabuda en aquest projecte, sinó que es centrarà

en l'estudi del funcionament de les bateries i després la selecció del sistema de refrigeració apropiat perquè el mòdul funcioni correctament.

8. Càlculs

Un dels objectius principals d'aquest projecte és l'obtenció d'un model matemàtic per al desenvolupament d'un mòdul de bateria refrigerada per aire. Per aquest propòsit s'utilitza el software MatLAB (codi a l'apèndix 2). A través de funcions i dades conegudes, com la capacitat, mides o tensió nominal de treball, s'obtenen els paràmetres necessaris per analitzar el sistema de refrigerada per aire i determinar el ventilador més apropiat a partir d'un catàleg.

Després d'escollit el ventilador, es necessita un sistema de refrigeració extern per refredar l'aire utilitzat per controlar la temperatura de la bateria. Com s'ha fet amb el ventilador, aquest sistema també s'ha escollit d'un catàleg, prenent atenció a les especificacions que millor funcionen per l'aplicació d'aquest treball.

S'ha escollit treballar amb un sistema tancat per evitar que els canvis de temperatura externs afectin el comportament i vida de la bateria. D'aquesta manera, el control de temperatures màxima i mínima és més fàcil i fa que el sistema sigui més segur pels mòduls.

8.1. Determinació del valor alpha

Primerament s'ha de calcular la calor generada per cada cel·la de la bateria, les dades físiques de la qual consten a l'apartat 3 i les dades elèctriques i de capacitat es troben a l'annex 1.

Per calcular la calor generada es considera que l'eficiència del mòdul és del 90%. Aquesta dada s'ha decidit a partir de dues fonts. La primera és la Taula 16 on diu que l'eficiència de les bateries d'ions de liti és de 99,9% i l'altra dada s'ha extret de la Taula 15 de l'article Car battery eficiències, Stanford University, 2010, on consta que aquesta és d'entre 80 i 90%. Per tant, a partir d'aquests rangs d'eficiència, s'ha escollit un valor orientatiu i mig pel rang donat per cada font, com s'ha argumentat en l'apartat de caracterització de la bateria. De totes maneres, també s'ha afegit un apartat amb una taula resum dels resultats que s'obtidrien per una eficiència del 80%, que representa els resultats del pitjor dels casos.

8.1.1. Procediment per eficiència del 90%

L'eficiència del 90% s'aplicarà a la potència P generada per la cel·la, on la quantitat de potència perduda P_{heat} per l'eficiència es pot relacionar amb la quantitat de calor generada Q . Per fer aquest càlcul, es necessita el corrent que circula per la bateria i la tensió nominal a la que treballa. La potència nominal P_{out} es determina substituint el corrent i tensió nominal de la bateria (veure annex 1) en la següent equació:

$$P_{out} = I \cdot V \quad \text{Eq. 14}$$

On:

P_{out} és la potència nominal de sortida de la bateria (W)

I és la intensitat de corrent (A)

V és la tensió nominal (V)

Per calcular la potència relacionada amb les pèrdues de calor s'assumeix que l'eficiència de la bateria és del 90%, per tant, també ho és la de cada cel·la individual. A partir d'aquesta assumpció, les pèrdues de calor es poden calcular amb l'Eq. 15:

$$P_{heat} = P_{out} \cdot (1 - 0,9) \quad \text{Eq. 15}$$

On:

P_{heat} és la potència perduda per dissipació de calor relacionada amb l'eficiència (W)

Amb aquesta equació i el valor obtingut en l' Eq. 14, es té que $P_{heat} = 16W$. Si assumim que el corrent és contant en el temps i en la situació de funcionament estacionària, es pot determinar el flux de calor dissipada Φ com l'energia relacionada amb la pèrdua de potència.

Per tant:

$$\Phi = \frac{P_{heat}}{t} \quad \text{Eq. 16}$$

On:

t és el temps, i en aquest cas, en treballar en una situació estacionària, es considera d'1 segon (s)

De l' Eq. 16 s'obté que: $\Phi = 16J$.

La segona característica que s'ha de definir és el coeficient de transferència de calor per convecció α . Per això es necessita implementar el codi matemàtic amb MatLAB qu es troba a l'annex 2. Aquest el que fa és un càlcul iteratiu fins que la temperatura de l'aire a la sortida del mòdul és estrictament inferior als 40°C. Aquesta temperatura es treu de la Taula 4 on hi ha un rang d'entre 0°C i 45°C, però s'ha escollit treballar amb un màxim de 40°C per no treballar amb la situació límit.

En aquest càlcul iteratiu, s'agafa un valor inicial de velocitat per al flux d'aire, a partir d'aquest valor arbitrari es calcula el Reynolds amb l' Eq. 7. A partir d'aquí, si el Reynolds és estrictament inferior a 2300, s'utilitza l' Eq. 9 per determinar el número de Nusselt, mentre que per Reynolds majors o iguals a 2300 s'aplica l'Eq. 10 per calcular el Nusselt en règim turbulent.

Un cop els valors de Reynolds i Nussels estan calculats, per la iteració corresponent, el coeficient de transferència de calor per convecció es pot calcular aplicant la variant de l'Eq. 17 següent:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \quad \text{Eq. 17}$$

L'últim pas ja és calcular la temperatura de l'aire a la sortida de la bateria. Aquest es considera que surt a la mateixa temperatura a la que es troba la bateria en aquell moment, per aquesta raó deixa d'haver intercanvi de calor, per tant és el valor que farà

que la iteració es pari quan el seu valor sigui estrictament inferior als 40°C que s'ha decidit siguin la temperatura màxima. Aquesta temperatura es calcula a partir de la variant de l'Eq. 18 següent:

$$T_H = \frac{\Phi}{\alpha \cdot A} + T_C \quad \text{Eq. 18}$$

On:

T_H és la temperatura de l'aire a la sortida del mòdul (K)

Φ és el flux de calor perduda, calculada a l' Eq. 16 (J)

α és el coeficient de transferència de calor per convecció calculat a l'Eq. 17 $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right)$

A és l'àrea de la meitat de la ranura de la Figura 1 o Figura 15, ja que cada ranura està en contacte amb dos mòduls al mateix temps (m^2)

T_C és la temperatura a la que l'aire entra al mòdul i a la que s'ha de refrigerar en sortir d'aquest, en aquest cas s'ha considerat de 20°C, perquè és la temperatura de l'ambient en condicions normals i s'ha decidit treballar amb aquesta restricció (K)

Si aquesta temperatura és major o igual a 40°C, tota la seqüència anterior de càlculs es repeteix incrementant abans la velocitat del flux d'aire en 0,01 m/s. Aquest increment és d'una centèsima, doncs es vol una exactitud de dos decimals en els càlculs de temperatura.

Després de calcular els valors del coeficient i temperatura màxima depenent de la velocitat de cada iteració es dibuixa una gràfica que relaciona la temperatura màxima de l'aire a la sortida del mòdul i el valor del coeficient de convecció, Figura 16.

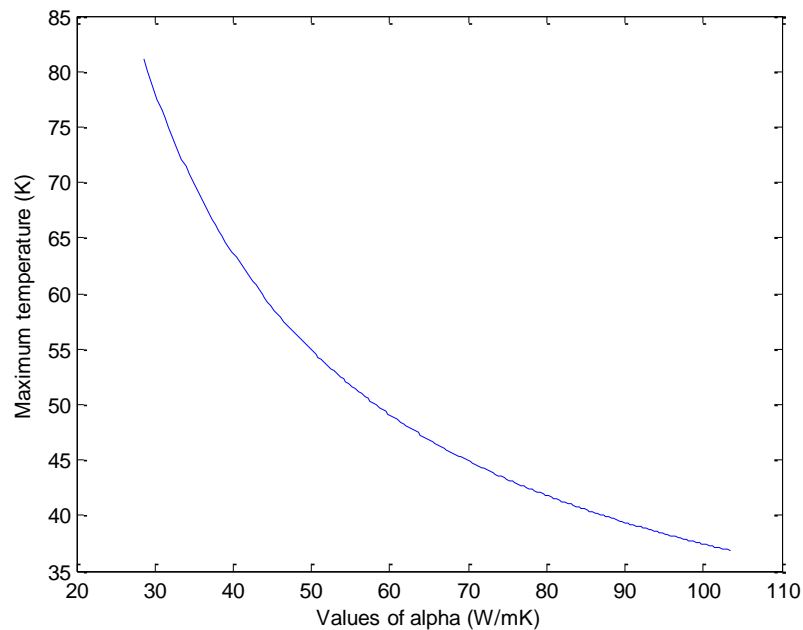


Figura 16. Temperatura màxima depenent del coeficient de transferència de calor per convecció a una velocitat de flux d'aire fixada de 20,20 m/s (Font: MatLAB)

De la Figura 16 s'ha de remarcar que el valor que el coeficient de transferència de calor per convecció per una temperatura màxima de 40°C de l'aire a la sortida del mòdul, que és la temperatura màxima a la que pot estar per continuar refrigerant-lo, i tenint en compte les dades per la bateria adjuntes a l'annex 1, és de $\alpha = 87,2245 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$. Per tant, es conclou que el valor d'alpha seleccionat per aquest projecte és $\alpha = 87,22 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$.

8.1.2. Resultats per una eficiència del 80%

La taula resum dels resultats de l'apartat anterior es troba a l'apartat 9, però aquí es mostra la taula resum dels obtinguts si s'hagués fet l'estudi per una eficiència del 80% (considerada l'eficiència en el pitjor escenari) i, a més, se'n comparen els resultats obtinguts amb els d'una eficiència del 90% (considerat el valor mitjà).

Taula 5. Taula resultats d'alpha per una eficiència del 80% i comparativa amb els resultats per eficiència del 90% (Font: MatLAB)

CARACTERÍSTIQUES	Eficiència 80%	Eficiència 90%
Alpha	$125,58 \frac{W}{m^2 \cdot K}$	$87,23 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
Temperatura màxima de la bateria	39,99 °C	39,99 °C
Velocitat de l'aire per refredar la bateria	31,86 m/s	20,20 m/s
Volum de flux d'aire necessari per refredar la bateria	184,48 L/s	60,07 L/s

Com es pot veure a la taula, per aconseguir que la temperatura màxima de la bateria no superi els 40°C, el coeficient de transferència de calor per convecció és aproximadament un 43% més alt en l'estudi del pitjor escenari que és el d'eficiència del 80%. Com a conseqüència, la resta de característiques de l'aire utilitzat per refrigerar la bateria també són majors als obtinguts per l'eficiència del 90%, considerada un valor mitjà a partir del qual s'han fet els càlculs i dimensionat del sistema de refrigeració.

La conseqüència d'aquesta diferència en el valor d'alpha és l'increment del volum de flux d'aire necessari per refredar els mòduls de la bateria i aquest és d'aproximadament un 207%. Això provoca que les dimensions dels ventiladors capaços de proporcionar aquest valor de flux d'aire també augmentin, de manera que no compleixin els requisits de mides fixats en l'apartat 7 de caracterització de la bateria. Tot i així, modificant les decisions de disseny preses es podria fer-ne l'estudi corresponent amb el procediment detallat en els apartats següents.

8.2. Selecció del ventilador

Un cop el valor d'alpha s'ha determinat, es pot calcular el flux d'aire total que ha de ser subministrat a la bateria per assegurar-ne que la temperatura màxima sigui inferior a 40°C. Primerament es calcula el flux parcial que ha de passar per mitja ranura:

$$\dot{V}_{cell} = c \cdot A \cdot 1000 \frac{1}{m^3} \quad \text{Eq. 19}$$

On:

\dot{V}_{cell} és el flux d'aire que ha de travessar la meitat d'una ranura (L/s)

c és la velocitat del flux (m/s)

A àrea de la meitat de la ranura per on circula l'aire, Figura 1 o Figura 15 (m²)

A partir d'aquest número, es pot calcular el flux d'aire que ha de passar a través de tota la bateria considerant ara l'àrea de la secció transversal de tota la ranura i en número de ranures, que són 7:

$$\dot{V}_{batt} = \dot{V}_{cell} \cdot 2 \cdot n \quad \text{Eq. 20}$$

On:

\dot{V}_{batt} és el flux d'aire total que circula per la bateria (L/s)

\dot{V}_{cell} és el flux d'aire que ha de travessar la meitat d'una ranura (L/s)

$2 \cdot n$ és el número de ranures, multiplicat per 2 ja que el flux calculat per 1 cel·la és de la meitat de l'àrea d'una ranura

De l'Eq. 20 s'obté que el flux d'aire per la bateria és de $\dot{V}_{batt} = 60,07 l/s$.

8.2.1. Estudi viabilitat del ventilador

Un cop es té calculat el valor del flux d'aire, característica que es necessita per escollir el ventilador, se'n busca un capaç de subministrar el mateix flux o major que el requerit a partir de les dades d'un catàleg.

El catàleg de ventiladors amb el que es treballa primerament és de l'empresa Casals Ventilación. En aquest catàleg, les unitats de velocitat de flux d'aire que són capaçes de proporcionar els ventiladors està donat amb m^3/h enlloc de l/s , per tant, el primer pas és fer un canvi d'unitats del valor de flux d'aire que s'ha obtingut amb l'Eq. 20 a partir del factor de conversió següent:

$$\dot{V}_{battm^3/h} = \dot{V}_{batt} \cdot 3,6 \quad \text{Eq. 21}$$

On:

$\dot{V}_{battm^3/h}$ és el valor del flux d'aire (m^3/h)

\dot{V}_{batt} és el valor del flux d'aire obtingut a l'Eq. 20 (L/s)

D'aquest factor de conversió es té que $\dot{V}_{battm^3/h} = 216,25 m^3/h$, i aquest és el valor que s'ha d'utilitzar per escollir el ventilador que millor s'adapti a partir del catàleg.

També és important tenir en compte que, per escollir un ventilador, és preferible que el seu punt de treball sigui a alta pressió estàtica, però baixa velocitat de gir (rpm del ventilador).

Una altra restricció que s'ha marcat és que, per no incrementar la secció transversal del sistema, el ventilador no ha de superar les mesures 131x366,5mm que la bateria fa, veure Figura 15.

El primer model que es considerarà és el BT2 125. Per aquest es tenen les següents característiques:

- Les dimensions del ventilador amb l'esquema detallat:

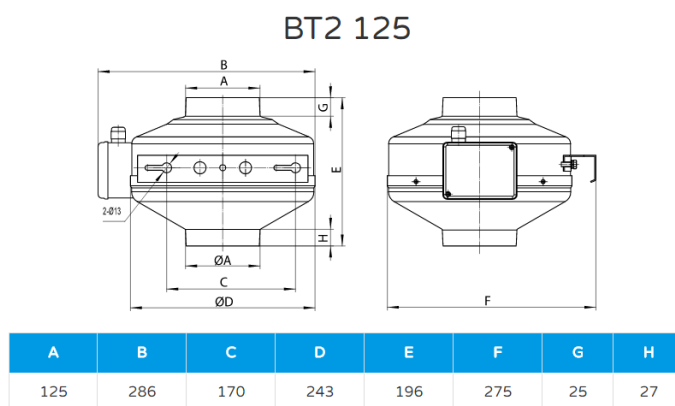


Figura 17. Esquema del ventilador BT2 125 (Font: www.casals.tv/es, 2017)

- Les característiques tècniques de funcionament:

Fan

Weight	Flow
3 Kg	350 m3/h

Motor

Power	Capacitor	I max. 230 V
0.073 kW	3Å,µF 450V	0,33 A

Figura 18. Característiques ventilador BT2 125 (Font: www.casals.tv/es, 2017)

Com es pot veure en la Figura 17, el disseny del ventilador no concorda amb dimensions i forma al que es vol per l'aplicació. Es tracta d'un ventilador per aplicacions industrials i es vol un ventilador de forma quadrada i de poca alçada per minimitzar l'espai que ocupa tot el sistema (l'amplada màxima s'ha considerat que ha

de ser de 131mm i la dimensió E, que fa referència a l'amplada d'aquest és de 196mm). Per aquesta raó, es desestima de l'estudi.

Pel que fa al segon model escollit per l'estudi, el HJEM 20 M4, les característiques de disseny són les següents:

- Les dimensions del ventilador amb l'esquema detallat:

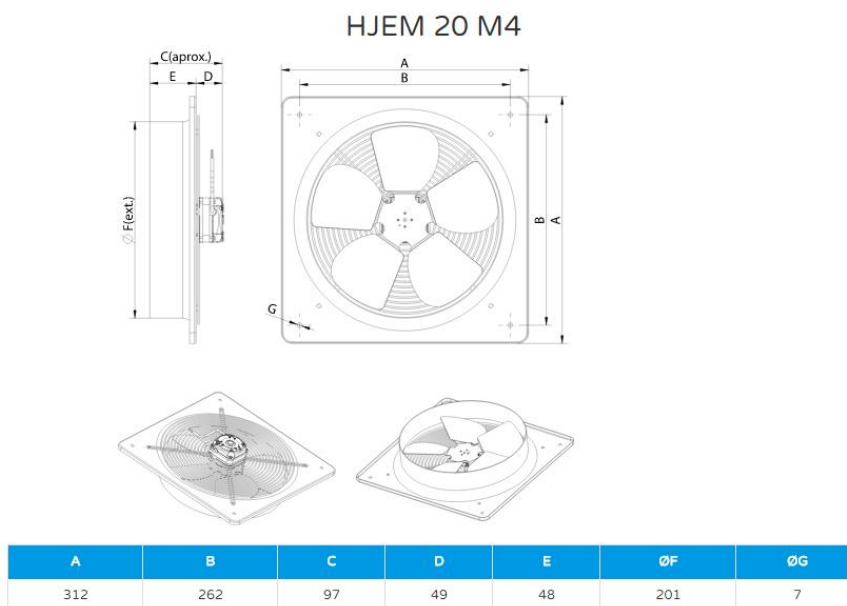


Figura 19. Esquema del ventilador HJEM 20 M4 (Font: www.casals.tv/es, 2017)

- Les característiques de disseny i funcionament del ventilador:

Fan

Weight	Flow
1.5 Kg	500 m3/h

Motor

Power	RPM Motor	I max. 230 V
0.029 kW	1320	0,21 A

Figura 20. Característiques ventilador HJEM 20 M4 (Font: www.casals.tv/es, 2017)

Aquest segon model sí que encaixa, pel que fa a dimensions, al que es necessita i és capaç de proporcionar el flux d'aire necessari. En aquest cas, el següent pas és estudiar, en el punt de treball, la pressió estàtica a la que està el ventilador per conèixer-ne la velocitat de rotació, pressió estàtica del ventilador i capacitat de subministrar el flux d'aire a la velocitat necessària. Això es fa a la Figura 21.

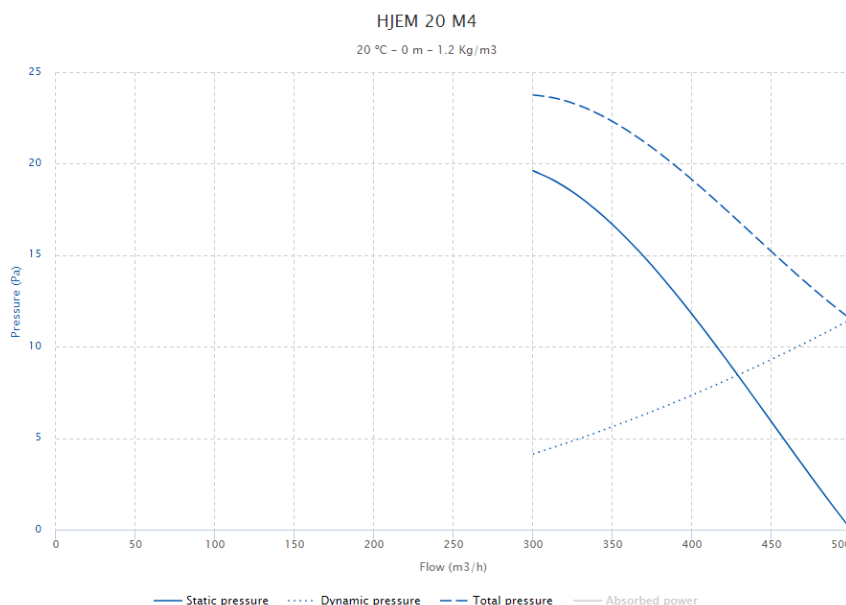


Figura 21. Corba característica de funcionament del ventilador HJEM 20 M4
(Font: www.casals.ts/es, 2017)

El problema que presenta aquest model és que el flux màxim capaç de proporcionar és 500m³/h, però per a un flux d'aproximadament 216m³/h no funciona adequadament, doncs és un punt de funcionament molt per sota de l'òptim per al ventilador. Com es pot observar en la corba de funcionament, no hi ha dades disponibles per aquest cas i, per tant, no funcionaria per l'aplicació que es vol estudiar.

Per altre costat, es té el catàleg de ventiladors amb el que treballa l'empresa SUNON per comparar els ventiladors i fer un estudi més ampli de les possibilitats del mercat. En aquest catàleg, les unitats de velocitat de flux d'aire que són capaços de proporcionar els ventiladors està donat amb CFM enlloc de l/s, per tant, el primer pas és fer un canvi d'unitats del valor de flux d'aire que s'ha obtingut amb l'Eq. 20 a partir del factor de conversió següent:

$$\dot{V}_{battCFM} = \frac{\dot{V}_{batt}}{0,47194745} \quad \text{Eq. 22}$$

On:

$\dot{V}_{battCFM}$ és el valor del flux d'aire (CFM)

\dot{V}_{batt} és el valor del flux d'aire obtingut a l'Eq. 20 (L/s)

D'aquest factor de conversió es té que $\dot{V}_{battCFM} = 127,27 \text{ CFM}$, I aquest és el valor que s'ha d'utilitzar per escollir el ventilador que millor s'adapti.

Amb aquesta dada, i les restriccions de velocitat de gir, pressió estàtica i dimensions utilitzades anteriorment, s'escullen les opcions que s'ajusten millor als requeriments anteriorment citats. Per aquesta raó, es menyspreen els models amb velocitats de gir per sobre els 10.000 rpm ja que són velocitats molt altes i hi ha opcions que s'ajusten millor als requeriments anteriorment citats i els ventiladors de dimensions 140x140mm s'han desestimat d'entre les opcions possibles per ser de dimensions fora de les considerades en les condicions de disseny.

Amb aquestes restriccions, queden cinc models possibles que les compleixen i apareixen a la Taula 6 i Taula 7 marcats amb el requadre groc.

Taula 6. Especificacions del model amb mides 92x92x38mm
(Font: catàleg SUNON, 2016)

Model	Bearing	Rating Voltage	Power Current	Power Consumption	Speed	Air Flow	Static Pressure	Noise	Weight	Curve
	2BALL Sleeve	(VDC)	(mA)	(WATTS)	(RPM)	(CFM)	(inch-H ₂ O)	(dB(A))	(g)	
PF92381BX-000U-A99	☉	12	4000	48.00	13000	182.4	2.94	72.1	210.0	1
PF92381B1-000U-A99	☉	12	1700	20.40	9800	138.1	1.95	63.7	210.0	2

D'aquestes dimensions, un dels ventiladors, el de referència PF92381B1-000U-A99 s'ha menyspreat perquè la velocitat del punt de funcionament supera les 10.000 rpm.

Taula 7. Especificacions del model amb mides 120x120x38mm
(Font: catàleg SUNON, 2016)

Model	Bearing	Rating Voltage	Power Current	Power Consumption	Speed	Air Flow	Static Pressure	Noise	Weight	Curve
	2BALL Sleeve	(VDC)	(mA)	(WATTS)	(RPM)	(CFM)	(inch-H ₂ O)	(dB(A))	(g)	
PMD1212PMB1-A (2).GN	☉	12	1600	19.2	4200	190.0	0.65	54.0	330.0	1
PMD1212PMB2-A (2).GN	☉	12	1200	14.4	3800	170.0	0.54	51.0	330.0	2
PMD2412PMB1-A (2).GN	☉	24	760	18.2	4200	190.0	0.65	54.0	330.0	1
PMD2412PMB2-A (2).GN	☉	24	570	13.7	3800	170.0	0.54	51.0	330.0	2

Per als ventiladors d'aquestes dimensions, com la resta de dades són iguals, tan sols es tindran en compte els ventiladors que consumeixin menys potència. És a dir, es menyspreen els de referències: PMD1212PMB1-A (2).GN i D1212PMB2-A (2).GN.

El següent pas és estudiar, en el punt de treball, la pressió estàtica a la que està el ventilador, per escollir la millor opció de ventilador tenint en compte velocitat de rotació, pressió estàtica del ventilador i capacitat de subministrar el flux d'aire a la velocitat necessària. Això es fa la Figura 22 i la Figura 23. En ambdues figures hi ha dues línies amb els noms 1 i 2, això fa referència a última columna, on especifica quina línia representa cada un dels models descrits en la Taula 6 i Taula 7.

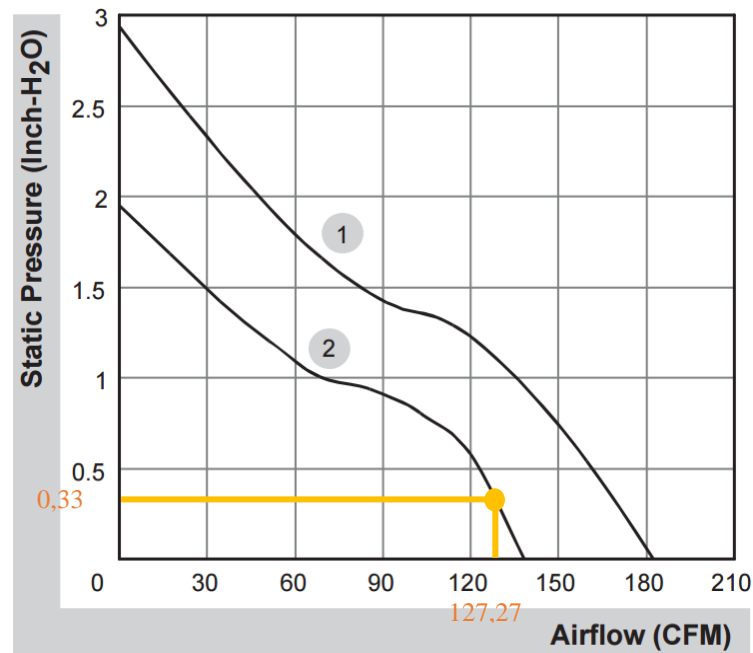


Figura 22. Pressió estàtica model amb mides 92x92x38mm
(Font: Catàleg SUNON, 2016)

Tot i que aquest ventilador compleixi amb tots els requisits, no és el que s'utilitzarà en l'aplicació perquè la velocitat de gir màxima d'aquest és de gairebé 10.000 rpm i com treballa pròxim al límit, la velocitat real serà pròxima al màxim de 9.800rpm. Tot i que sigui el que treballa amb la pressió estàtica més alta, l'objectiu en aquest cas és minimitzar la velocitat de gir i es menysprea per aquesta raó.

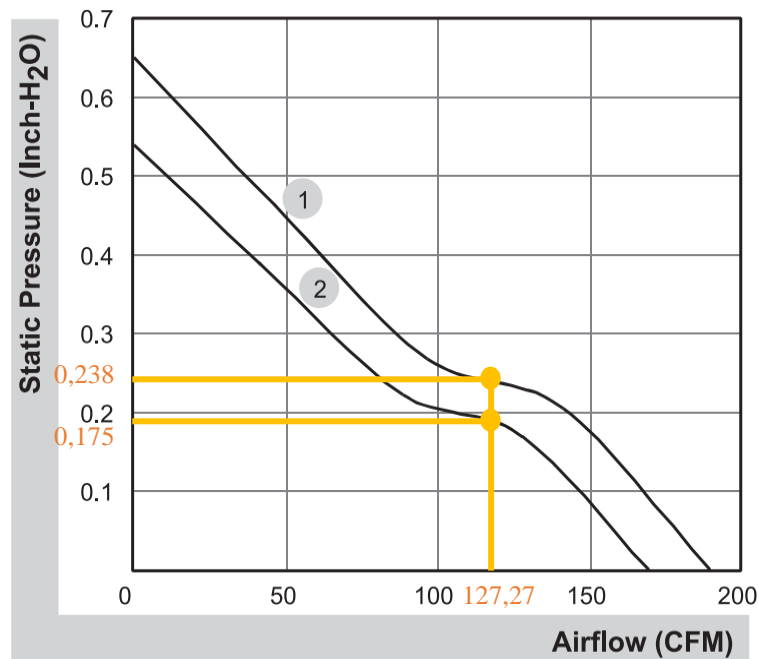


Figura 23. Pressió estàtica model amb mides 120x120x38mm
(Font: Catàleg SUNON, 2016)

Per aquests dos models de ventiladors es tenen valors molt semblants de pressió estàtica, fet que farà que no sigui tan sols aquesta variable l'encarregada de determinar quina és la millor opció. Com no es disposa d'un gràfic de velocitat de gir en funció del flux d'aire que proporciona, aquestes velocitats es calculen a partir d'una regla de tres lineal, Eq. 23, per obtenir-ne un valor aproximat i en ambdós casos aquest és de l'ordre de les 2.800rpm. Això significa que tampoc és una variable determinant per l'elecció. A partir d'aquí, mirant la Taula 6, s'ha escollit que el ventilador que s'utilitzarà en l'estudi del projecte és el PMD2412PMB2-A (2).GN. Aquesta decisió s'ha pres per tres factors: no es vol sobredimensionar excessivament el ventilador, per tant, amb el que pot proporcionar un flux d'aire de 170 CFM n'hi ha suficient. Per altra banda, aquest consumeix menys potència i és menys sorollós.

La feina de trobar catàlegs de ventiladors amb les corbes de funcionament i totes les dades de disseny d'aquests ha estat difícil, doncs els fabricants proporcionen dades a mitges per evitar rèpliques més barates d'empreses amb les què competeixen. Per altra

banda, una dada que es necessitava era la corba de velocitat de gir, que per manca d'aquesta s'ha aproximat a una funció lineal per poder fer els càlculs.

Un cop presentats totes les opcions, a mode d'informació addicional, s'adjunta una taula amb els preus d'aquests models. L'empresa CASALS no ven els seus productes online, de manera que s'ha hagut de demanar-ne el preu i l'oferta està disponible a l'annex 6.

Taula 8. Comparació de preus del ventiladors estudiats (Font: estudi propi)

BT2 125	HJEM 20 M4	PF92381B1-000U-A99	PMD2412PMB2-A/B
94,05 €	71,61 €	21,19 €	38,39 €

Aquesta taula és informativa i orientativa. Com es pot veure, els ventiladors de l'empresa Casals Ventilación són més cars (oferta de preus disponible a la Figura 27 de l'annex 6) ja que són uns components destinats a la ventilació industrial i tenen potències superiors a les dels ventiladors del catàleg de SUNON. Però, com s'ha dit a la caracterització de la bateria, el preu no és una variable de disseny per la sistema del projecte.

8.2.2. Caracterització del ventilador

Un cop s'ha escollit el ventilador que es farà servir, se'n fa una caracterització més concreta, amb les mides i plànols disponibles corresponents.

Primer de tot es mostren els plànols amb les acotacions pertinents del ventilador i una imatge real d'aquest:

120x120x38 mm

170.0~190.0 CFM

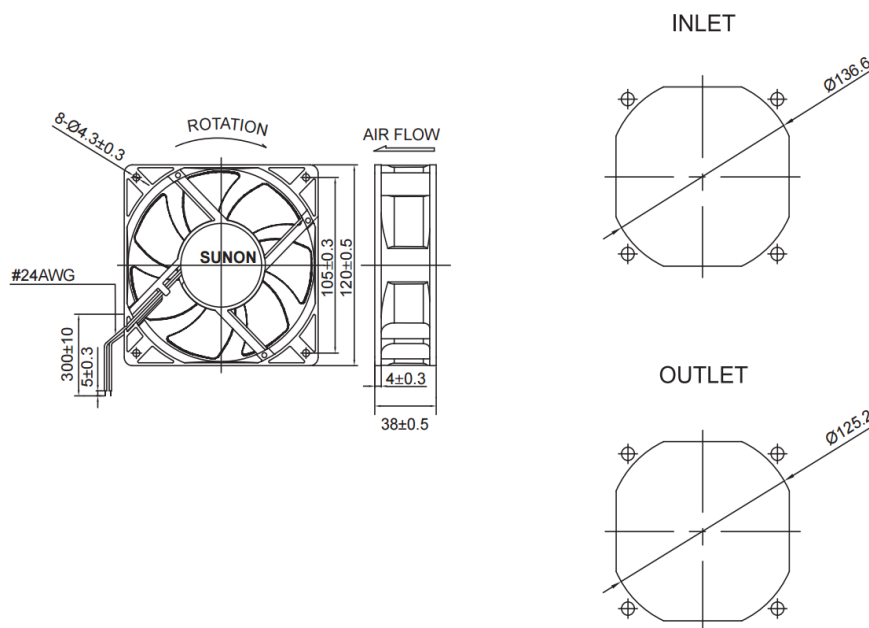


Figura 24. Plànol acotat del ventilador (Font: Catàleg SUNON, 2016)

En aquesta figura es pot veure que hi ha el plànol acotat del ventilador, i a més dues imatges més amb unes anotacions que marquen un diàmetre. La imatge on diu inlet

acota el diàmetre del conducte per on entra l'aire de l'exterior si treballa en un circuit obert, o d'una canonada si es tracta d'un circuit tancat.

Per altre costat, la imatge on diu outlet acota la mida del conducte pel qual l'aire surt del ventilador amb la velocitat desitjada.

També s'adjunta la taula d'especificacions sol del ventilador que es farà servir per fer l'estudi del treball:

Taula 9. Especificacions del ventilador escollit en l'apartat 5.2.1
(Font: catàleg SUNON, 2016)

Model	Bearing	Rating Voltage	Power Current	Power Consumption	Speed	Air Flow	Static Pressure	Noise	Weight	Curve
	2BALL Sleeve	(VDC)	(mA)	(WATTS)	(RPM)	(CFM)	(inch-H ₂ O)	(dB(A))	(g)	
PMD2412PMB2-A (2).GN	☉	24	570	13.7	3800	170.0	0.54	51.0	330.0	2

En aquesta es mostra tan sols les característiques del punt de treball límit, però el que s'ha de caracteritzar ara és el punt de treball real, en el que el ventilador proporciona un flux de 127,27 CFM. Per això s'estudia el gràfic que el representa, i en aquest cas, com es pot veure a l'última columna de la Taula 9, la corba que interessa és la número 2.

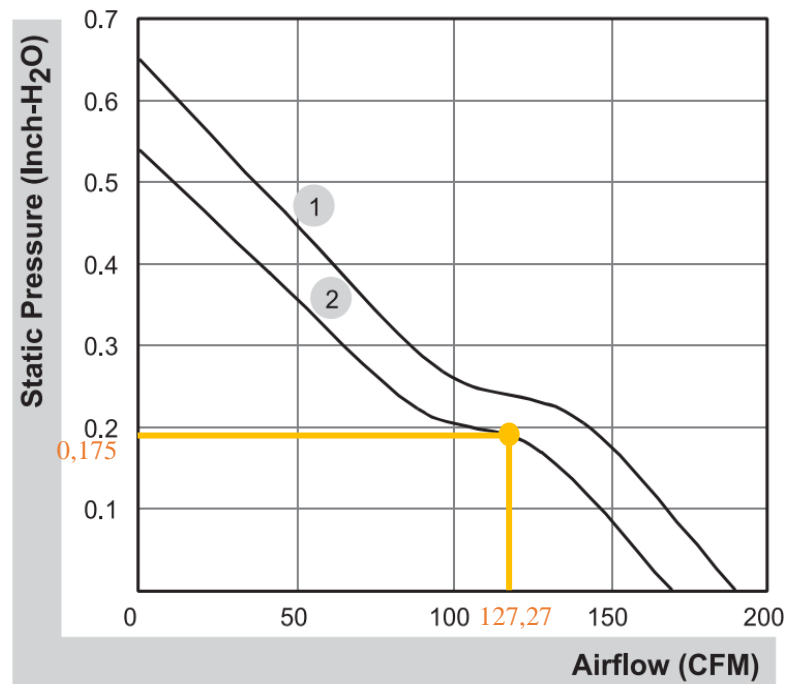


Figura 25. Corba que caracteritza el ventilador escollit (corba 2)

(Font: Catàleg SUNON, 2016)

Com el gràfic no és interactiu, per determinar el valor de la pressió estàtica en el punt de treball s'ha utilitzat un càlcul d'extrapolació lineal tant per l'eix vertical com per l'eix horitzontal.

Per calcular la velocitat de gir del ventilador al punt de treball es suposa que incrementa linealment a partir de l'Eq. 23:

$$c_{fan} = \frac{c_{fanmax} \cdot \dot{V}_{batt}}{\dot{V}_{fanmax}} \quad \text{Eq. 23}$$

On:

c_{fan} és la velocitat de gir en el punt de funcionament (rpm)

c_{fanmax} és la velocitat de gir del motor al seu punt màxim (rpm)

\dot{V}_{batt} és el volum de flux d'aire requerit (CFM)

\dot{V}_{fanmax} és el volum d'aire màxim capaç de subministrar el ventilador (CFM)

El valor que s'obté de l'equació anterior és $c_{fan} = 2845 \text{ rpm}$, per tant, ara el punt de funcionament del ventilador està determinat i es resumeix a la Taula 10.

Taula 10. Resum de dades del punt de funcionament del ventilador (Font: estudi propi)

Model	Velocitat (rpm)	Flux d'aire (CFM) / (m³/s)	Pressió estàtica (Inch-H ₂ O) / (Pa)
PMD2412PMB2-A (2).GN	2845	127,27 / 0,06	0,175 / 43,79

En aquesta taula, s'ha ficat, en marró, les dades del ventilador en unitats del Sistema Internacional, per tenir una referència més clara de la seva magnitud.

8.3. Selecció del sistema de refrigeració extern

Primer de tot s'ha de calcular la calor que el sistema de refrigeració extern ha de ser capaç d'extreure de l'aire provinent del mòdul de la bateria. Per això s'aplica l'Eq. 24, on es té en compte la diferència de temperatura que l'aire ha d'experimentar per tornar al punt inicial del bucle.

$$\Phi = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad \text{Eq. 24}$$

On:

Φ és la quantitat de calor que s'ha d'extreure del flux d'aire (J)

\dot{m} és el flux de massa de l'aire (kg/s)

c_p és la calor específica del flux, en aquest cas és aire $\left(\frac{J}{kg \cdot K}\right)$

ΔT és el decrement de temperatura que ha d'experimentar l'aire (K)

Per completar l'Eq. 24 s'ha de determinar el flux de massa que té associat el flux d'aire calent que surt de la bateria, per això es té l'equació següent:

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}}{\rho} \quad \text{Eq. 25}$$

On:

\dot{V} és el volum d'aire (m^3/s)

ρ és la densitat de l'aire (kg/m^3)

Combinant les dues equacions anterior, es determina que $\Phi = 1039$ J. Amb aquesta quantitat de calor que s'ha d'extreure, representa el valor mínim de calor que el sistema de refrigeració ha de ser capaç d'extreure, es pot escollir un sistema de refrigeració adequat a partir d'un catàleg, com s'ha fet amb el ventilador.

8.3.1. Estudi de viabilitat

La calor que es necessita transferir des del sistema cap a l'exterior és de 1039 J, i a partir de l'Eq. 16 es pot aïllar un altre cop la potència que representa, de manera que s'han d'extreure, 1039 W. Aquest valor és aproximadament 1kW de potència i això es pot traduir a 4.000BTU/h. A partir d'aquesta dada, s'ha buscat catàlegs de sistemes de refrigeració adequats, però ha resultat molt difícil trobar catàlegs de sistemes complets amb suficients dades per escollir amb propietat. Els problemes més recurrents que s'han presentat han estat:

La potència de transferència de calor no es presentava entre les dades del sistema catalogat amb diferents mides per als evaporadors.

En cas que aquesta dada sigues donada pel fabricant, aquesta potència era massa gran per l'aplicació que es necessita. Aquests sistemes són pensats per aplicacions de refrigeració industrial o de la llar, no bateries de vehicles elèctrics.

En el cas que es trobés un sistema amb dades i que aquestes fossin apropiades per l'aplicació estudiada, aquest era una petita nevera, però no un sistema per acoblar a una bateria.

Per aquesta raó, s'ha considerat que muntar un sistema a partir de parts individuals és la millor opció per acoblar a la bateria del sistema estudiat en el treball.

Hi ha fabricants que proporcionen kits per muntar l'aire condicionat en cotxes antics. La idea és aconseguir un kit, que consisteix en un compressor, un condensador, un ventilador, un assecador, un evaporador, el motor del ventilador, hardware per la seva instal·lació i components electrònics, i muntar-lo com part del sistema de refrigeració de la bateria. Aquest sistema de components separats es mostra a la Imatge 2. Dins la unitat negra del centre hi ha muntats l'evaporador i el motor del ventilador.



Imatge 2. Kit A/C universal per vehicles convencionals

(Font: www.restomodair.com, 2016)

Un kit de refrigeració tèrmica com aquest té una potència de refrigeració de 12.700 BTU/h. Un sistema com aquest pot ser adaptat a diferents aplicacions ja que inclou un compressor elèctric, la versatilitat d'aquest el fa interessant per l'aplicació estudiada.

8.3.2. Caracterització del sistema de refrigeració

Un cop s'ha decidit la solució pel sistema de refrigeració extern, se n'ha de descriure el muntatge amb la resta del sistema compost per la bateria i el ventilador dimensionat a l'apartat 5.2.2.

Del kit de la Imatge 2, el ventilador i el motor del ventilador no es fan servir ja que aquests s'han dimensionat i escollit degudament. A partir d'aquí, i seguint el model de la Figura 9, es connecta l'evaporador a la sortida de l'aire calent provinent de la bateria. A aquest també hi arriba la canonada amb refrigerant que arriba fred de la vàlvula d'expansió. Per altra banda, l'evaporador o bescanviador té dues sortides, una per on flueix l'aire fred un altre cop cap al ventilador per ser enviat cap a les ranures dels mòduls de la bateria per començar el cicle un altre cop, i l'altra connectada a un compressor on es comprimeix el líquid refrigerant R134a i es enviat al condensador on aquest refrigerant es refreda transferint calor a l'ambient exterior. L'últim pas connecta el condensador amb la vàlvula d'expansió on s'expandeix el líquid i també es refreda per l'efecte d'expansió. Com s'ha dit abans, la vàlvula d'expansió connecta amb l'evaporador un altre cop, formant un segon cicle tancat de líquid refrigerant.

Aquest kit es pot aconseguir a Restomod Air Inc. (<http://www.restomodair.com>)

9. Resultats

Un cop realitzats tots els càlculs es té una taula de resultats on es resumeixen els valors obtinguts més significatius per al projecte, que han set utilitzats pel dimensionament del sistema de refrigeració, des del ventilador fins al sistema de refrigeració per refrigerant R134a extern.

Taula 11. Resum de resultats (Font: estudi propi)

FLUX D'AIRE PER REFRIGERAR ELS MÒDULS	
Alpha	$87,23 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
Temperatura màxima de la bateria	39,99 °C
Velocitat de l'aire per refredar la bateria	20,20 m/s
Volum de flux d'aire necessari per refredar la bateria	60,07 L/s
CARACTERÍSTIQUES DEL VENTILADOR	
Àrea	120x120 mm
Volum de flux d'aire màxim	80,23 L/s
Pressió estàtica al punt de treball	0,175 inch – H ₂ O
Velocitat de gir al punt de treball	2845 rpm
SISTEMA DE REFRIGERACIÓ EXTERN	
Calor que s'ha d'extreure del flux d'aire	1039 W

El codi escrit amb el software MatLAB està implementat de tal manera que el bucle que calcula el valor d'alpha para quan la temperatura de l'aire al sortir de la bateria és estrictament inferior als 40°C, que coincideix amb la màxima temperatura que s'ha definit a la que pot arribar la bateria del sistema estudiat. Quan la temperatura de l'aire arriba a aquest límit significa que no hi ha un sobre refredament, però la refrigeració és suficient per mantenir la bateria dins el rang de temperatura desitjat. D'aquesta manera, es treu el màxim rendiment dels components utilitzats.

El valor del coeficient de transferència de calor per convecció α que es mostra a la Taula 11 ha estat calculat, a partir del codi MatLAB, amb les dades i condicions que es desenvolupen a l'apartat 8. Si es compara aquest valor amb el rang que s'especifica a la Taula 3 per flux de gas amb convecció forçada, es veu que es troba dins d'aquest.

Però, per altre costat, la velocitat del flux d'aire necessari per refredar els mòduls de la bateria que ha de travessar les ranures de la bateria ha de tenir una velocitat molt alta comparada amb les dimensions de la bateria, que té una àrea de $0,05\text{m}^2$. Això s'hagués pogut millorar utilitzant un refrigerant líquid enlloc d'aire amb convecció forçada. D'aquesta manera, el sistema refrigerant hagués tingut un coeficient de transferència de calor més alt i el flux de refrigerant, en aquest cas líquid, seria menor.

Pel que fa a oferta de components, per escollir el ventilador s'ha utilitzat dos catàlegs. En aquests hi ha un gran ventall de models amb diferents característiques, fet que fa fàcil trobar-ne un que s'adapti a l'aplicació amb la que s'està treballant. En el cas d'aquest projecte, s'ha decidit dissenyar el sistema de refrigeració utilitzant un sol ventilador, enlloc d'utilitzar-ne dos de més petits i menys potència per aconseguir el mateix flux d'aire. L'objectiu d'aquesta decisió ha estat reduir el preu del sistema el màxim possible. Però, per altra banda, també es volia que l'àrea d'aquest fos més petita o igual que l'àrea de la superfície de la bateria. Tot i aquestes restriccions, i gràcies a l'amplia gama de ventiladors disponibles, s'ha pogut trobar un que les compleix i se'n pot veure el fabricant i preu a la taula següent.

En canvi, quan s'ha calculat la calor a extreure del flux d'aire un cop ha refrigerat la bateria, el valor d'aquesta és molt inferior als valors estàndard que s'han pogut llegir en articles científics i automobilístics, per tant, la potència de refrigeració del sistema extern també és molt inferior al de les aplicacions estàndard. Això ha fet difícil trobar un sistema de refrigeració extern adequat per l'aplicació estudiada i que no tingués una potència de refrigeració 3 vegades superior a la necessitada.

Taula 12. Factura del material (Font: recerca pròpia)

PRODUCTE	FABRICANT	PREU (€)
BATERIA	Smart Battery	6076,09
VENTILADOR	SUNON Group	38,39
KIT DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓ EXTERN	Restomod AIR	800-1500

En la taula anterior es veu el resum de material utilitzat pel conjunt total de a bateria i el sistema de refrigeració d'aquesta. També hi consta el preu dels components, per poder fer una estimació del preu total del sistema.

10. Present i futur de les bateries

És un fet que el planeta Terra està sofrint un escalfament global degut a les activitats que els humans hi duem a terme. La contaminació que provoquen els aerosols, substàncies químiques com el plom i l'àcid sulfúric de les bateries, i la crema de combustibles fòssils com el carbó o el petroli i els seus derivats són algunes de les causes d'aquest increment accelerat de la temperatura de la Terra i s'han de controlar.

En aquesta línia, la Unió Europea vol impulsar la recerca i la utilització d'alternatives que respectin el medi ambient. Per aquesta raó, els vehicles elèctrics han sofert un increment de ventes durant els darrers anys així com l'increment d'ajudes i subvencions, per animar els conductors a decantar-se per aquests models. De totes maneres, les bateries són lliures d'emissió en la seva utilització, però primer s'han hagut de fabricar i necessiten electricitat per les recàrregues.

Aquestes necessiten electricitat per ser fabricades i per cada recàrrega, però no sempre aquesta prové de fonts renovables com l'energia solar o la eòlica, sinó que s'aconsegueix a partir de la combustió de combustibles fòssils. Aquest fet fa que tot i que no contaminin en el seu ús, no siguin lliures d'emissions. Per altra banda, les bateries contenen materials tòxics com el plom o l'àcid sulfúric que requereixen d'un reciclatge o disposició adequats, o elements com el liti i el cobalt, que s'extreuen de mines, situades a Sud-Amèrica o el continent africà, no sempre sota un control de seguretat i drets dels treballadors adequats posant en risc els mateixos treballadors o tribus indígenes que resideixen en aquelles àrees mineres.

10.1. Reciclatge

Cada tipus de bateria té un diferent tractament de reutilització o reciclatge depenent dels seus components i elements químics. Per aquesta raó es fa una breu explicació de les formes de reciclatge de cada tipus tractat en el projecte.

10.1.1. Bateries d'àcid-plom

Les bateries d'àcid de plom van ser les primeres en ser desenvolupades i sortir al mercat, per aquesta raó la recerca de vies pel seu reciclatge ha estat extensa i actualment se'n pot reciclar fins un 97% de cada unitat que queda inutilitzada. Però també és una de les més perilloses, doncs dos dels components químics necessaris per les reaccions que es duen a terme són altament tòxics:

- L'àcid sulfúric és un químic corrosiu, que en contacte amb la pell o membranes mucoses pot causar cremades molt greus. El mateix passa si es posa en contacte amb el sòl, aquelles terres queden inutilitzades doncs les plantacions es cremen i les terres queden infèrtils per futures germinacions.
- El plom és un metall pesat, un altre exemple n'és el mercuri. Aquests no poden ser eliminats ràpidament per l'organisme i s'acumulen interferint i dificultant els processos metabòlics vitals. Per aquesta raó, tant la ingestió o inhalació de quantitats considerables pot ser fatal. Però no sols és perillós en contacte directe amb els humans, si aquest metall es disposa sobre un camp on hi ha plantacions, els vegetals absorbeixen aquestes partícules i les emmagatzemen transmetent-les així als éssers vius que les ingereixen.

Per aquestes raons, és molt important la correcta gestió de les bateries d'àcid de plom. En aquesta gestió, se'n obtenen els següents subproductes, els quals són tractats individualment:

- Compostos de plom: aquests es divideixen en òxids, metàl·lics i borns. Aquests compostos que contenen plom i una part d'antimoni, són tractats en plantes metal·lúrgiques per l'obtenció de plom secundari que s'usa en altres aplicacions posteriorment.
- Polipropilè: es tracta i s'extrudeix per l'obtenció de polipropilè reciclat que normalment es reutilitza en la indústria automobilística per fer parts plàstiques de cotxes.
- Electròlit: aquest conté una dissolució d'aigua i àcid sulfúric en una concentració del 20%. Una part d'aquest es reutilitza en el propi procés de reciclatge, però la major part es enviat a plantes de tractament i valorització, on es crema i de l'energia que es genera s'obté electricitat i vapor.
- Separadors: suposen al voltant el 3% del pes total de la bateria. N'hi ha de diferents classes i composicions plàstiques, però fins l'actualitat, és l'única part d'aquests tipus de bateries al que no se li ha trobat un procés de reciclatge adequat.

10.1.2. Bateries d'ions de liti

El cas de les bateries d'ions de liti és ben diferent. El liti no és un element interessant per les indústries del reciclatge, ja que el preu aproximat és de 6€/kg, a més el liti és un metall fluix que és tòxic sols en grans quantitats.

Per aquestes raons, de les bateries d'ions de liti són desmantellades per extreure'n el cobalt, i la resta de components són rebutjats.

En aquest cas es veu com, si no hi ha perill d'intoxicació o interès econòmic per algun dels components, les activitats de reciclatge i reutilització no es duen a terme com s'hauria i es deixen al rebuig materials que, avui no escassegen, però que en uns anys poden resultar necessaris per moltes aplicacions, ja que per exemple l'ús del liti és cada vegada major, i que estigui en perill de no poder abastir les necessitats del mercat i, en conseqüència, el preu se'n vegi incrementat.

Per tant, s'hauria de mirar no sols en el benefici econòmic sinó també els beneficis social i medi ambiental que pot comportar el malbaratament de materials dels quals es tenen recursos limitats.

10.1.3. Bateries de níquel i hidrur metàl·lic

Aquestes bateries s'utilitzen més en els vehicles híbrids que en els purament elèctrics. I la avantatge que tenen respecte les de Níquel-Cadmi és que no contenen l'element cadmi, molt tòxic i difícil de reciclar. En canvi, les d'hidrur metàl·lic redueixen dràsticament depenent del metall utilitzat per l'elèctrode negatiu.

El primer pas és desmantellar i separar els convertidors catalítics i les parts elèctriques. Un cop fet aquest pas, les peces s'envien al centre de reciclat on es tracten fins obtenir els elements bàsics que la componen.

El primer pas és introduir les bateries a un forn on són tractades a altes temperatures, procés que facilitarà la posterior separació dels components. Després es trossegueix i netegen les restes que surten del forn i es separen els metalls reutilitzables d'aquestes a partir d'un sistema classificador.

Aquests materials separats es porten a la planta de refinament on s'aïlla l'hidròxid de níquel a través dels processos de separació d'impureses i l'obtenció de sulfat de níquel. Aquest hidròxid es pot tornar a utilitzar per noves bateries minimitzant així l'impacte ambiental, el cost d'extracció del metall i es tracten correctament els residus tòxics.

10.2. Recerca

Actualment hi ha un interès creixent en el desenvolupament de noves bateries amb més prestacions per impulsar la venda de vehicles elèctrics. Per fer-los més atractius pels consumidors, les característiques a millorar principals són el temps de càrrega i la capacitat doncs es vol poder conduir el vehicle la màxima distancia possible. Per tant, un dels principals punts de recerca és la manera d'incrementar la densitat energètica de les bateries. Això ja està passant, cada any la capacitat de les bateries augmenta un 5%, però es necessita un salt més dràstic per ser un canvi important per la indústria. Per altre costat, si s'incrementa la capacitat de les bateries, també incrementarà els temps de càrrega, raó per la qual també és necessari buscar mètodes de càrrega més veloços i eficients. Tot això s'ha d'aconseguir sense incrementar, o reduint el preu d'aquestes, sinó les farà menys atractives pels consumidors.

Per les raons anteriors, es fa evident que es necessiten sistemes de bateries, d'enginyeria i comercials nous que permetin aconseguir aquests objectius amb rapidesa i un cost baix. Per això s'investiga en nous tipus de bateries:

- Bateries de silici: aquestes substitueixen l'elèctrode negatiu per grafit de silici, això permet un increment de l'energia específica.
- Bateries d'estat sòlid: es substitueix l'electròlit líquid per on circulen els electrons per un polímer. Aquesta mesura augmenta la seguretat ja que disminueix el risc d'incendis.
- Bateries de metall-ió: es substitueix el liti per un metall com l'alumini fàcil de reciclar i menys contaminant.
- Bateries de metall-aire: moltes investigacions estan bolcades en aquest tipus de bateries, ja que el principal problema que aquestes presenten és la recàrrega. Aquestes bateries produeixen electricitat a partir de la reacció de l'oxigen de l'aire i el metall (liti, alumini, zinc o magnesi). El metall s'oxida formant hidròxid i, a més, generant el corrent.

Aquestes bateries tenen unes densitats energètiques molt altes, fins a 8 vegades la d'una d'ions de liti. Però com a contra partida, els metalls aquests s'oxiden ràpidament en contacte amb l'aigua deixant-les inutilitzades i tenen una recàrrega molt prolongada.

- Utilització de supercondensadors: també coneguts com condensadors electrolítics de doble capa, són uns dispositius capaços d'emmagatzemar quantitats d'energia molt majors que la de la resta de bateries. Els seus avantatges són:
 - Es poden carregar i descarregar amb intensitats molt altes sense patir cap deteriorament, per tant les recàrregues es poden fer en qüestió de pocs minuts, enlloc d'haver d'esperar hores com és el cas de les bateries d'ions de liti. No necessiten una corba de càrrega determinada per tant no pateixen sobrecàrregues a diferència de les d'àcid de plom.
 - La vida útil també incrementa respecte la resta de tipus ja que permeten milions de cicles si es duen a terme en condicions adequades.
 - No existeix la possibilitat d'incendi per sobrecàrrega, per tant, les fa més segures. I minimitza el manteniment.
 - El rendiment a baixes temperatures no és un problema, inclús allarga la vida útil d'aquestes.

Tot i això també presenten desavantatges i limitacions:

- Aquestes poden emmagatzemar grans quantitats d'energia, tot i això és menor a la que poden emmagatzemar les bateries tradicionals d'ions de liti.

- El percentatge d'auto descàrrega és més alt que en les convencionals fent aquestes menys fiables si han estat sense carregar-se un llarg període de temps.

Aquesta tecnologia té un elevat cost W/h ja que el cost inicial del super condensador és més alt que el de la resta de tecnologies. No obstant, aquesta diferència en el preu inicial es veu reduïda per la llarga durabilitat i el baix manteniment que requereixen.

11. Conclusions

Els principis bàsics de la termodinàmica apresos en cursos anterior dels estudis cursats han estat útils per al desenvolupament del treball. Tot i així, han sorgit nous temes en els que s'ha hagut d'inserir sense coneixements previs com els sistemes de refrigeració per aplicacions automobilístiques. També ha estat un tema molt interessant profunditzar en la recerca actual de bateries per a vehicles elèctrics i conèixer quins són els camins que s'esperen seguir al respecte per, en un futur, poder disposar de bateries molt més potents i amb capacitats d'emmagatzematge millors, però sense implicacions negatives per al medi ambient.

Per aquest projecte també ha estat important els coneixements de física i termodinàmica involucrats en les bateries així com coneixements químics per entendre les reaccions que fan possible el seu funcionament. En aquest camí, la recerca i aplicació de la ciència i tecnologia relacionades amb les bateries elèctriques m'ha ajudat a aprendre i adquirir nous coneixements sobre la temàtica.

La recerca de les característiques de mòduls de bateria refrigerats per aire m'ha fet tenir una idea més propera sobre una temàtica tan actual com són tots els aspectes relacionats amb vehicles elèctrics. Així mateix els impactes tan socials, econòmics i mediambientals que comporta.

Un altre punt que m'ha ajudat a millorar aquest projecte ha estat el llegir i interpretar dades i resultats, així com entendre els catàlegs de fabricants i poder escollir correctament el que més convé per cada aplicació. La interpretació dels resultats matemàtics i teòrics per reconèixer possibles errors de càlcul o procediment ha estat un punt important també del desenvolupament del projecte.

Les conclusions relacionades amb els objectius inicials del projecte són:

- He après i ampliat el meu coneixement relacionat amb el principi químic que regeix el funcionament de les bateries i els components necessaris per evitar o

minimitzar el deteriorament prematur degut al sobreescalfament i assegurar-ne el bon funcionament durant el temps de vida útil marcat pel fabricant.

- Un punt molt important d'aquest treball era l'estudi de les diferents tecnologies utilitzades per fabricants d'automòbils elèctrics i és un objectiu en el que he indagat, no sol en les tecnologies presents en els vehicles actuals, sinó que m'he interessat en els passos que s'estan duent a terme per millorar-les.
- Com a objectiu principal també hi ha la recerca dels mètodes de reciclatge dels tipus de bateries esmentats i les característiques que es pretenen millorar i desenvolupar per part del món científic. Aquest ha estat un apartat molt enriquidor per a mi, doncs m'ha semblat molt interessant conèixer les vies de treball que s'estan duent a terme per millorar certs aspectes de les bateries. En aquest sentit, també ha estat interessant saber quines són les variables de disseny que es volen millorar i com es pretén arribar als objectius marcats a partir de diferents tecnologies i vies de treball.
- Gràcies al treball he indagat en les tecnologies presents i a partir de l'estudi i interpretació de les dades d'aquestes he estat capaç d'escollir el tipus de mòduls que s'utilitzaran en el desenvolupament del projecte.
- Per altra banda, pel que fa a la definició del sistema de refrigeració extern, no he tingut alternatives entre les que escollir, doncs la manca d'informació i catàlegs d'aquests i la diferència notable entre els valors de refrigeració necessaris per a l'aplicació i disponibles al mercat ha fet que sigui difícil l'estudi de viabilitat corresponent.
- Escriure i utilitzar un codi matemàtic per determinar les característiques d'aquest sistema de refrigeració ha estat molt positiu, doncs he posat en pràctica els coneixements de codificació en sistemes CAS apresos en el transcurs dels meus estudis en la Universitat de Lleida i he optimitzat en gran part la feina de càlcul. D'aquesta manera, tan sols es necessita canviar els valors de les variables que es volen modificar i els resultats són immediats.

La realització d'aquest projecte m'ha servit per iniciar un projecte de recerca sobre vehicles elèctrics adequat i en profunditat. Això ha ajudat a fer-me una idea més real de com s'ha de fer un treball de recerca i els passos previs necessaris per abordar l'estudi d'un tema tan actual i complicat com són els vehicles elèctrics i la seva viabilitat.

12. Agraïments

En primer lloc m'agradaria agrair a la meva tutora del treball de final de grau Íngrid Martorell Boada per acceptar ajudar-me i tirar endavant aquest projecte amb mi tot i les seves limitacions de salut, que espero que millorin aviat.

Als meus pares, germanes i família el seu recolzament ens moments en què se'm va fer més costa amunt el desenvolupament del treball i aportar idees que m'han set de molta utilitat. També els vull agrair l'ajuda que m'han brindat aportant un ambient adequat i de silenci en els moments que volia concentrar-me.

A tots els professors que he tingut des de primària fins l'últim curs d'Universitat pels coneixements que han compartit amb mi i que em serviran al llarg de la meva vida personal i professional. Així com als professors de la Hochschule Esslingen dels quals vaig aprendre molt sobre sostenibilitat i la gestió d'aquesta a Europa.

A tots els meus amics de la Universitat i el poble de Vilanova de la Barca pels consells basats en experiències prèvies en situacions similars i els consells. També vull agrair els amics que vaig fer a l'ERASMUS doncs em van mostrar diferents punts de vista i vaig aprendre molt de les seves tradicions i costums.

I al Tero, per formar part del primer esborrany d'aquest treball. Sense ell no estaria escrivint aquestes línies.

Gràcies.

REFERÈNCIES

Bibliografia

Bosch, 2014. Automotive Handbook. 9th edition. Karlsruhe: Robert Bosch GmbH.
ISBN: 9781119032946

Çengel, Yunus A. and John M. CİMBALA, 2006. Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones (*Mechanics of fluids: fundamentals and applications*). 1st edition. McGraw-Hill.
ISBN: 9789701056127

Puranen, J. 2015. Termodynamiikka ja virtaukset (*Thermodynamics and fluxes*).Projecte final de grau. Universitat de Tampere TAMK. Arxiu PDF.

Referències WEB

University of Colorado, Lecture: Lead-acid Batteries. Arxiu PDF.
ecee.colorado.edu/~ecen4517/materials/Battery.pdf

- Reaccions químiques que permeten el funcionament de les bateries. 15/11/2016

Wikipedia, Lead-acid Battery. Encyclopaedia. Article
en.wikipedia.org/wiki/Lead-acid_battery

- Reaccions químiques que permeten el funcionament de les bateries. 27/11/2016

Electropaedia, Cell Chemistries – How Batteries Work. Woodbank Communications Ltd. Article d'enciclopèdia.
www.mpoweruk.com/chemistries.htm

- Reaccions químiques que permeten el funcionament de les bateries. 01/12/2016

Ajoneuvotekniikka, Akut.. Motiva Oy. Article

www.motiva.fi/liikenne/henkiloautoilu/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/akut

- Tipus de bateries. 02/12/2016

Wikipedia, Electric Vehicle Battery. Article

en.wikipedia.org/wiki/Electric_vehicle_battery

- Tipus de bateries. 02/12/2016

hybridCARS, Teardown Reveals BMW i3 Is 'Most Advanced Vehicle on the Planet'. Article.

www.hybridcars.com/teardown-reveals-bmw-i3-is-most-advanced-vehicle-on-the-planet/

- Informació sobre les bateries elèctriques dels BMW. 10/12/2016

Electropaedia, Battery and Energy Technologies - Thermal management. Woodbank Communications Ltd. Article d'enciclopèdia.

www.mpoweruk.com/thermal.htm

- Teoria sobre la transferència de calor. 15/12/2016

Electromovilidad, Tipos de bateria para coche eléctrico (*Types of batteries for electric vehicles*). Article.

electromovilidad.net/tipos-de-bateria-para-coche-electrico/

- Tipus i dades determinants d'una bateria. 18/12/2016

Smart Battery. Catàleg WEB.

www.lithiumion-batteries.com/products/24-volt-lithium-batteries/sb24300.php

- Catàleg de la bateria estudiada. 04/01/2017

SUNON Group. DC Fan & Blower Series. Online catalogue.

<http://www.sunon.com/pro2.php?c1=10&c2=5>

- Catàleg del ventilador. 10/01/2017

Pesaran, A. & Keyser, M. 2001. Thermal Characteristics of Selected EV and HEV Batteries. Arxiu PDF.

www.nrel.gov/transportation/energystorage/pdfs/long_beach_btm.pdf

- Teoria sobre la transferència de calor. 16/01/2017

SPIE Connecting minds. Advancing light. Defense & Security. Improving Lithium battery safety . Article

spie.org/newsroom/4823-improving-lithium-battery-safety

- Característiques de seguretat de les bateries d'ions de liti. 20/01/2017

Rahman, M. Rahman H. Mahlia, T. & Sheng, J. Liquid cooled plate heat exchanger for battery cooling fan of an electric vehicle (EV). Arxiu PDF.

iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/32/1/012053/pdf

- Informació sobre les bateries elèctriques NISSAN. 26/01/2017

Restomod Air inc. Custom-made vintage car air-conditioning systems. Catàleg WEB.

<http://www.restomodair.com>

- Catàleg del sistema de refrigeració extern. 28/01/2017

Hilary Morgan, Michigan Technological University, Department of Geological and Mining Engineering and Science. Heat is transferred by radiation, conduction and convection. Article.

www.geo.mtu.edu/~hamorgan/bigideaswelcome.html

- Imatge i informació sobre la transferència de calor. 08/04/2017

The oil crash. Apuntes de Baterías para vehículo eléctrico 2: Baterías de litio. Article.

www.blogscapitalbolsa.com/article/3869/apuntes_de_baterias_para_vehiculo_electrico_2_baterias_de_litio.html

- Característiques de les bateries d'ions de liti. 03/04/2017

Sebastián Bardo. Almacenamiento distribuido en viviendas para alisar la curva de demanda de energía eléctrica. Annex.

upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/9360/Anexos_Sebasti%20n_Bardo.pdf?sequence=2

- Informació sobre els tipus de bateries i comparatives. 03/04/2017

Fernando Augeri. Estado de carga SOC (State Of Charge). Article

www.cise.com/portal/notas-tecnicas/item/583-estado-de-carga-soc-state-of-charge.html

- Informació sobre el significat de SOC. 10/04/2017

Hybrid Battery State of Health and State of Charge. Article.

www.thehybridshop.com/media/blogs/hybrid-battery-state-of-condition-and-state-of-health/

- Comparació i explicació de SOC i SOH. 10/04/2017

Cheng Lina , Aihua Tanga,Wenwei Wanga. The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE2015 A review of SOH estimation methods in Lithium-ion batteries for electric vehicle Applications.Volum 75 del llibre Energy Procedia ISBN: 1876-6102 Arxiu PDF.

www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215009674

- Informació sobre el significat de SOH. 10/04/2017

George Bower. Tesla or GM: Who Has The Best Battery Thermal Management?. Article

insideevs.com/tesla-or-gm-who-has-the-best-battery-thermal-management-bower/

- Informació sobre les bateries elèctriques TESLA i General Motors. 10/04/2017

Florian Schoewel, Elmar Hockgeiger, Grup BMW, Munic. THE HIGH VOLTAGE BATTERIES OF THE BMW i3 AND BMW i8. Presentació.

wiki.aalto.fi/download/attachments/91692283/high_voltage_batteries_of_bmw_vehicles.pdf?version=1

- Informació sobre les bateries elèctriques BMW. 10/04/2017

John Sun . Car Battery Efficiencies. Article.

large.stanford.edu/courses/2010/ph240/sun1/

- Eficiències de les bateries presentades. 11/04/2017

Battery University. Comparison Table of Secondary Batteries. Article

batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries

- Comparació de les bateries presentades. 11/04/2017

Battery University. Charging at High and Low Temperatures. Article
batteryuniversity.com/learn/article/charging_at_high_and_low_temperatures

- Rang de temperatures de treball de les bateries. 11/04/2017

Enciclopèdia Catalana, SAU. Diccionari.

www.diccionari.cat

- Definicions de paraules clau.

U.S. Department of Health and Human Services.

medlineplus.gov

- Informació sobre els efectes d'elements com el plom o l'àcid sulfúric.

Mitos y realidades en el reciclado de baterías eléctricas para coches. Article

www.motorpasion.com/espaciotoyota/mitos-y-realidades-en-el-reciclado-de-baterias-electricas-para-coches

- Mètodes de reciclatge de bateries 13/04/2017

Waymo quiere que te des una vuelta en uno de sus Chrysler Pacifica Hybrid autónomos en Phoenix. Article.

www.motorpasionfuturo.com

- Gestió de les bateries utilitzades. 23/04/2017

Volkswagen ya habla de 600 Km de autonomía para 2020. Article.

www.motorpasionfuturo.com/coches-electricos/volkswagen-ya-habla-de-600-km-de-autonomia-para-2020

- Futur de les bateries. 24/04/2017

El futuro de las tecnologías de las baterías. Article.

movilidadelectrica.com/baterias-albufera/

- El futur de les bateries i aspectes que s'han de millorar. 24/04/2017

Alfonso Crujera. Electro-Etching Made Easy. Article.

www.nontoxicprint.com/electroetching.htm

- Parts fonamentals d'una bateria. 25/04/2017

Mistral Associates. Program for Refrigeration & Air Conditioning Professionals. Diagrames.

<http://www.mistralassociates.com/ph/r134a-ph.html>

- Diagrama P-h del refrigerant R134a. 27/04/2017

Alfonso Crujera. Electro-Etching Made Easy. Article.

www.nontoxicprint.com/electroetching.htm

- Parts fonamentals d'una bateria. 25/04/2017

Brad Berman, ¿Cuanto cuesta sustituir la batería de un Tesla Model S?. Article.

www.motorpasionfuturo.com/coches-electricos/cuanto-cuesta-sustituir-la-bateria-de-un-tesla-model-s

- Preu i informació de les bateries TESLA 30/04/2017

Evolución del precio de las baterías según General Motors Article.

movilidadelectrica.com/evolucion-del-precio-de-las-baterias-segun-general-motors

- Preu i informació de les bateries GM 01/05/2017

BMW i3. Fitxa tècnica.

www.electromaps.com/coches-electricos/bmw/i3

- Preu i informació de les bateries BMW 01/05/2017

Gonzalo Lara, Cambiar la bateria del Nissan Leaf ya tiene precio. Article.

www.motorpasionfuturo.com/coches-electricos/cambiar-la-bateria-del-nissan-leaf-ya-tiene-precio

- Preu i informació de les bateries Nissan 01/05/2017

Electromaps. Fitxa tècnica.

www.electromaps.com/coches-electricos

- Preu i informació tècnica de diferents vehicles elèctrics 07/05/2017

Fanware Lite. Fitxa tècnica.

fanware.casals.tv/50/fans/3627?flow=250&pressure=10.1972&temperature=20&height=0

- Fitxa tècnica d'un ventilador Casals 10/05/2017

Fanware Lite. Fitxa tècnica.

fanware.casals.tv/50/fans/2284

- Fitxa tècnica d'un ventilador Casals 10/05/2017

Fanware Lite, per l'empresa CASALS. Catàleg WEB.

www.casals.tv/es

- Catàleg WEB dels ventiladors de l'empresa CASALS 10/05/2017

George Bower, Tesla or GM: Who Has The Best Battery Thermal Management? Article.

insideevs.com/tesla-or-gm-who-has-the-best-battery-thermal-management-bower

- Informació sobre el sistema de refrigeració de les bateries TESLA i GM

19/05/2017

Ibáñez, Nissan Leaf 2013, aclarando algunas cuestiones técnicas. Article.

www.motorpasionfuturo.com/coches-electricos/nissan-leaf-2013-aclarando-algunas-cuestiones-tecnicas

- Informació sobre les bateries i el sistema de refrigeració dels Nissan Leaf

21/05/2017

Paul Weissler, Electronics diverge in engineering Ford's hybrid C-Max and plug-in Energi. Article.

articles.sae.org/11705

- Informació sobre el sistema de refrigeració de les bateries FORD

22/05/2017

ANNEXOS

Annex 1. Full de dades de la bateria 24V, 25Ah

POWER & ENERGY

THE ELECTRIC ADVANTAGE

Nominal Voltage	25.6V
Charge Voltage	29.2V
Peak Discharge (5 Sec)	250A
Continuous Charge / Discharge Rate	25A
Capacity (amp hours)	25AH
Capacity (watts)	300W

SIZE & WEIGHT

ADVANTAGE

Weight	18 Lbs
Length	7.75"

Width 6.45"

Height 6.75"

TECHNOLOGY

ADVANTAGE

Usable Capacity (AH) 25AH

Depth of Discharge 100% DOD

Reserve Minutes @ 20A 150 min

Self Discharge <3% per mo

Chemistry Lithium Iron Phosphate
(LiFePO₄)

Cell Type Cylindrical

Modular Series or Parallel
Connection

Annex 2. Codi MatLAB

```
% COOLING_CONCEPT_FOR_BATTERIES

% Cell specifications

V=3.2; % V

I=50; % A

Pmax=V*I; % W

% Calculate_Pheat

eff=0.9;

Pheat=0;

Pheat=Pmax-(Pmax*eff); % W

% Calculation_Thot_Pheat=Qex

% Variables

Qex=Pheat; % J/s

L=0.12742; % m

vair=1.872e-5; % Cinematic viscosity kg/ms at 30°C

landa=0.02588; % Thermal conductivity W/mK at 30°C

Pr=0.7282; % At 30°C

Aex=0.1*0.12742; % Area heat exchanger battery m^2

Tc=20+273.15; % Temp. cold of the air K

den=1.164; % Density of the air kg/m^3 at 30°C

cp=1007; % Heat capacity J/kgK at 30°C

Acs=(0.0059*0.072)/2;
```



```
% Results
```

```
alpha % Thermal difusivity W/mK

Th % Maximum temperature of the battery

Vair % Total air volume going through the battery L/s

vel % Air velocity m/s


% Fan specifications

Af=0.12*0.12; % Area of 1 fan m^2

Vairmax=170*0.47194745; % Maximum volume flow of one fan
L/s

velfmax=3800; % Maximum velocity of the fan rpm


% Number of fans

Vair/Vairmax; % Rounded to 1


% Calculation of the working point of one fan

velfreal=(velfmax*Vair)/Vairmax % Working velocity rpm


%Area occupied for the fan related to the area of the
battery

Ab=0.3665*0.131;

place=(Af/Ab)*100


% Calculating the values to get a vector

velgraph=[5:0.1:25];

k=0;

Thotgraph=0;
```

```

for k=1:1:201

    Regraph(k)=(velgraph(k)*L)/vair;

    if Regraph(k)<2300

        Nugraph(k)=0.664*(Regraph(k)^0.5)*(Pr^(1/3));

    else

        Nugraph(k)=0.037*(Regraph(k)^0.8)*(Pr^(1/3));

    end

    alphagraph(k)=(Nugraph(k)*landa)/L;

    Thotgraph(k)=(Qex/(alphagraph(k)*Aex))+Tc;

    Thgraph(k)=Thotgraph(k)-273.15;

    Vaircellgraph(k)=velgraph(k)*Acs*1000;

    Vairgraph(k)=Vaircellgraph(k)*2*7;

end

plot(alphagraph,Thgraph) % Graph which represents the
maximum temperature of the battery depending on the alpha
xlabel('Values of alpha (W/mK)')
ylabel('Maximum temperature (K)')

% Calculating Q for the external cooling system
m=(Vair/1000)/den; % Mass flow of air kg/s
Q=m*cp*(Thot-Tc) % Heat to be taken off from the air J/s

```



Annex 3. Propietats de l'aire a 1 atm de pressió

Propiedades del aire a 1 atm de presión

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Densidad $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico c_p $\text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Nota: Para gases ideales, c_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P distinta a 1 atm se determinan cuando se multiplican los valores de ρ a la temperatura dada por P (en atm) y cuando se dividen ν y α entre P (en atm).

Fuente: Datos generados a partir del Software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198; and Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3; Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11; Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, y P. Hestermanis, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

Annex 4. Diagrama Pressió-Entalpia: refrigerant R134a

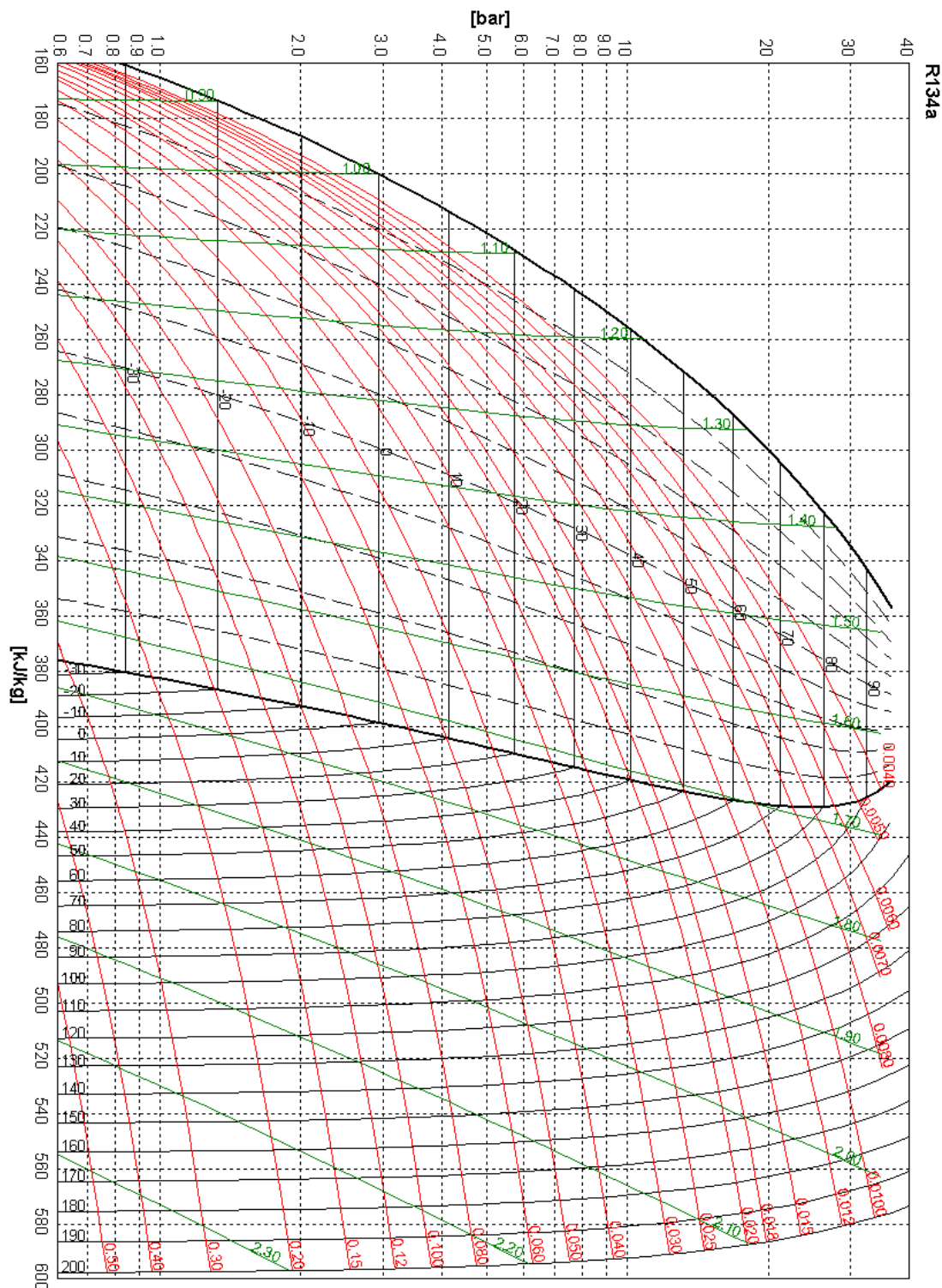


Figura 26. Diagrama de P-h del refrigerant R134a (Font: www.mistralassociates.com)

Annex 5. Taula comparativa de bateries existents

Taula 13. Comparació de les bateries dels vehicles elèctrics comentats al treball
(Font: resum pròpi)

Vehicle		Acceleració 0-100km/h (s)	Velocitat màxima (km/h)	Eficiència	Tipus de bateria	Autonomia a (km)	Dimensions de la bateria (mm)	Pes de la bateria (kg)	Preu de la bateria (€)
TESLA S	60 kWh	5,8	210	-	Ions de lití Panasonic	400	4.976x1.963x1.435	2.108	6.080
	75 kWh	5,8	225	-	Ions de lití Panasonic	480	4.976x1.963x1.435	2.108	7.600
	85 kWh	5,6	250	-	Ions de lití Panasonic	420	4.976x1.963x1.435	2.108	9.200
GM Bolt	60 kWh	7,0	145	-	Ions de lití LG	320	4.166x1.765x1.595	1.625	8.700
BMW i3	22 kWh	7,2	150	-	Ions de lití	190	3.999x1.775x1.578	1.195	-
	33 kWh	7,2	150	-	Ions de lití	300	3.999x1.775x1.578	1.320	7.000
FORD Focus	23 kWh	11,0	136	-	Ions de lití	160	4.358x1.823x1.484	1.311	6.000
Nissan Leaf	24 kWh	11,9	145	-	Ions de lití laminada	175	4.455x1.770x1.550	1.525	4.800
	30 kWh	11,5	150	-	Ions de lití laminada	250	4.455x1.770x1.550	1.570	-

Annex 6. Oferta de preus dels ventiladors CASALS



Lin.	Posic.	Código Artículo	Descripción	Cdad	Precio	Dtos.	Imp. Neto	Imp.Total
1		509212500	BT2 125	1	146,30	55,00	65,84	65,84
2		265201103	HJEM 20 M4	1	111,40	55,00	50,13	50,13
							TOTAL	115,97
IVA NO incluido								
OBSERVACIONES:								
POLÍTICA DE PORTES								
Pedidos hasta 300 € se cargarán 20 € en factura en concepto de portes.								
Pedidos de 300 € a 1.000 € se cargarán 15 € en factura en concepto de portes.								
Pedidos superiores a 1.000 € portes pagados.								
FECHA DE ENTREGA: XX SEMANAS TRAS EL PEDIDO								
Por favor, cuando haga el pedido o una consulta sobre esta oferta, indique el número de oferta.								
Fecha: 22/5/2017							Página N°: 1/1	

Figura 27. Oferta de preus de l'empresa CASALS pels ventiladors estudiats
(Font: recerca pròpia)

Annex 7. Taules consultades pel resum de la Taula 2

Taula 14. Característiques tècniques de les bateries de d'àcid de plom
(Font: upcommons.upc.edu, 2017)

A.1.2. Características técnicas

A continuación se presentan los valores típicos de los distintos tipos de celda de plomo-ácido considerados:

Tipo celda	SLI	Ciclo profundo	Estacionaria
Tensión nominal (V_{DC})	2	2	2
Tensión en circuito abierto (V_{DC})	1.90 ~ 2.15	1.90 ~ 2.15	1.90 ~ 2.15
Tensión final de la carga (V_{DC})	2.5	2.5	2.5
Tensión final de la descarga (V_{DC})	1.75	1.75	1.75
Eficiencia (DC-a-DC)	75% ~ 85%	75% ~ 85%	75% ~ 85%
Temperatura de trabajo ($^{\circ}C$)	-40 ~ 55	-20 ~ 40	-10 ~ 40
Energía específica (Wh/kg)	35	25	10 ~ 20
Densidad de energía (Wh/L)	70	80	50 ~ 70
Densidad de potencia	Alta	Moderadamente alta	Moderadamente alta

Tabla A.1 Características técnicas de las baterías de Plomo-Ácido

Taula 15. Taula d'eficiències (Font: large.stanford.edu/courses/2010/ph240/sun1, 2016)

Battery	Charge/Discharge Efficiency
Li-ion	80% - 90%
Pb-Acid	50% - 92%
NiMH	66%



Taula 16. Taula resum de característiques de les diferents bateries

(Font: batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries, 2017)

Specifications	Lead Acid	NiCd	NiMH	Li-ion ¹		
				Cobalt	Manganese	Phosphate
Specific energy (Wh/kg)	30–50	45–80	60–120	150–250	100–150	90–120
Internal resistance	Very Low	Very low	Low	Moderate	Low	Very low
Cycle life ² (80% DoD)	200–300	1,000 ³	300–500 ³	500–1,000	500–1,000	1,000–2,000
Charge time ⁴	8–16h	1–2h	2–4h	2–4h	1–2h	1–2h
Overcharge tolerance	High	Moderate	Low	Low. No trickle charge		
Self-discharge/month (room temp)	5%	20% ⁵	30% ⁵	<5% Protection circuit consumes 3%/month		
Cell voltage (nominal)	2V	1.2V ⁶	1.2V ⁶	3.6V ⁷	3.7V ⁷	3.2–3.3V
Charge cutoff voltage (V/cell)	2.40 Float 2.25	Full charge detection by voltage signature		4.20 typical Some go to higher V		3.60
Discharge cutoff voltage (V/cell, 1C)	1.75V	1.00V		2.50–3.00V		2.50V
Peak load current Best result	5C ⁸ 0.2C	20C 1C	5C 0.5C	2C <1C	>30C <10C	>30C <10C
Charge temperature	–20 to 50°C (–4 to 122°F)	0 to 45°C (32 to 113°F)		0 to 45°C ⁹ (32 to 113°F)		
Discharge temperature	–20 to 50°C (–4 to 122°F)	–20 to 65°C (–4 to 149°F)		–20 to 60°C (–4 to 140°F)		
Maintenance requirement	3–6 months ¹⁰ (topping chg.)	Full discharge every 90 days when in full use		Maintenance-free		
Safety requirements	Thermally stable	Thermally stable, fuse protection		Protection circuit mandatory ¹¹		
In use since	Late 1800s	1950	1990	1991	1996	1999
Toxicity	Very high	Very high	Low	Low		
Coulombic efficiency ¹²	~90%	~70% slow charge ~90% fast charge		99%		
Cost	Low	Moderate		High ¹³		

Table 1: Characteristics of commonly used rechargeable batteries. The figures are based on average

Taula 17. Taula resum de temperatura de funcionament de les bateries

(Font: batteryuniversity.com/learn/article/charging_at_high_and_low_temperatures, 2017)

Battery type	Charge temperature	Discharge temperature	Charge advisory
Lead acid	-20°C to 50°C (-4°F to 122°F)	-20°C to 50°C (-4°F to 122°F)	Charge at 0.3C or less below freezing. Lower V-threshold by 3mV/°C when hot.
NiCd, NiMH	0°C to 45°C (32°F to 113°F)	-20°C to 65°C (-4°F to 149°F)	Charge at 0.1C between -18°C and 0°C. Charge at 0.3C between 0°C and 5°C. Charge acceptance at 45°C is 70%. Charge acceptance at 60°C is 45%.
Li-ion	0°C to 45°C (32°F to 113°F)	-20°C to 60°C (-4°F to 140°F)	No charge permitted below freezing. Good charge/discharge performance at higher temperature but shorter life.

Table 1: Permissible temperature limits for various batteries. Batteries can be discharged over a large temperature range, but the charge temperature is limited. For best results, charge between 10°C and 30°C (50°F and 86°F). Lower the charge current when cold.